



M 2014

APLICAÇÃO DO ENSAIO COM PORTA VENTILADORA À AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE AO AR DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

SOFIA MANUEL LEITE DE MAGALHÃES RODRIGUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM 22 DE JULHO DE 2014

ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

APLICAÇÃO DO ENSAIO COM PORTA VENTILADORA À AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE AO AR DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

SOFIA MANUEL LEITE DE MAGALHÃES RODRIGUES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de
Almeida

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, meus mentores

Education is an ornament in prosperity and a refuge in adversity.

Aristotle

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado àqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desta dissertação. A todos eles o meu sincero agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos, pelo apoio, pelos conhecimentos transmitidos, pelas opiniões e críticas, pela contínua disponibilidade e colaboração na solução de problemas e dúvidas ao longo da realização deste trabalho mas, principalmente pela sua boa disposição característica que tornou o desenvolvimento desta tese um prazer.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, pelos conhecimentos, recomendações e conselhos que tão sabiamente transmitiu, pela cordialidade disponibilidade e dedicação constantemente demonstrada.

Ao Engenheiro Fernando Pedro Pereira, pela disponibilidade e ajuda na altura de realização dos ensaios. Os seus conhecimentos foram essenciais para a concretização da componente experimental deste trabalho.

Ao Laboratório de Física das Construções pela disponibilização do sistema da porta ventiladora entre outros equipamentos essenciais para a presente dissertação.

À família Pessoaana, Marina Matos, Simone Sousa, Helena Jesus e Rolando Freitas, que lado a lado caminharam comigo. Mantivemo-nos unidos desde o início e assim espero permanecer até ao fim. Vocês, sem dúvida, são parte do que sou. Obrigada pela sincera amizade, alegria e união.

À família Feupinha, que me recebeu de braços abertos. Uma estranha que incluíram num grupo sólido. Um obrigada sincero por toda a ajuda, sorrisos, brincadeiras, devaneios e companheirismo demonstrado. Mas principalmente obrigada por me terem feito sentir em casa.

Ao Diogo Araújo, por ter tornado este percurso numa suave caminhada. Pelas intermináveis explicações, constante motivação, compreensão, críticas e conselhos que desde o início me fizeram acreditar que este dia iria chegar.

A todos os meus amigos que, apesar de não mencionados, me acompanharam ao longo desta jornada. O meu sincero obrigada.

A toda a minha família que sempre me apoiou e guiou em todas as decisões da minha vida.

À minha mãe Palmira pela garra e valores que me transmitiu. Obrigada pela paciência, pelo incentivo, pela força, por todos os conselhos e principalmente pelo teu carinho.

Finalmente, ao homem a quem devo tudo, o meu pai João. Um exemplo de coragem e determinação, que sempre me transmitiu o amor e a segurança que só um verdadeiro pai sabe dar. Obrigada por estares sempre do meu lado.

RESUMO

A permeabilidade da envolvente é um dos fatores que mais influencia as condições higrotérmicas, a qualidade do ar do ambiente interno e o consumo energético dos edifícios. Em edifícios multifamiliares este fator contribui significativamente para os gastos globais em aquecimento e arrefecimento.

Atualmente em Portugal, o peso das infiltrações de ar, representa entre 30 % a 80 % do total de energia consumida pelas habitações. Têm sido feitos esforços no que toca ao melhoramento do desempenho relativamente à permeabilidade ao ar dos vários elementos construtivos, processos de construção e sistemas de ventilação, contribuindo ativamente para o aumento da estanquidade ao ar dos edifícios.

Daqui surge a necessidade, por forma a proceder a uma correta avaliação dos elementos constituintes da envolvente, de conhecer os parâmetros caracterizadores da permeabilidade ao ar, relativamente à representatividade de cada um para o grau de infiltrações total apresentado.

No entanto existe uma elevada escassez de estudos realizados que abordem esta temática daí que o principal objetivo do trabalho desenvolvido é que este represente um contributo para a área.

Para obtenção dos parâmetros mencionados foi utilizado o mecanismo “Porta Ventiladora” seguindo as diretivas especificadas na norma ISO 9972:2012.

A campanha experimental realizada, através da realização de ensaios de pressurização/ despressurização para diferentes casos de estudo, permitiu a caracterização da permeabilidade ao ar global das edificações assim como dos elementos construtivos constituintes da envolvente. Os ensaios foram realizados utilizando a seguinte gama de pressões: 10, 20, 30, 40 e 50 Pa.

Foi também realizada a caracterização das taxas de renovação horárias globais, para os diferentes casos de estudo, pelo Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação, procedendo-se à sua comparação com os resultados obtidos via experimental.

Concluído o estudo é de destacar o facto de o valor de renovações horárias obtido em condições analíticas ser sempre superior ao valor obtido experimentalmente.

Apurou-se ainda que os elementos com maior contribuição para as infiltrações registadas são as grelhas de admissão de ar e as caixilharias com um peso próximo de 20 %.

Com o registo dos resultados poderão ser tomadas medidas tendo em vista o aprimoramento de alguns componentes da construção assim como o desenvolvimento de um método de avaliação comum.

Palavras-Chave: Permeabilidade, elementos construtivos, porta ventiladora, ensaio pressurização, renovações horárias (Rph).

ABSTRACT

The building envelope's permeability is one of the factors that mostly influences the hicrothermal conditions, the air and internal environment quality and the energy consumption in buildings. In multifamily buildings, this factor contributes significantly to the global expenditures in both heating and cooling.

Nowadays, in Portugal, the weight of air infiltrations represents from 30 % to 80 % of the total of energy consumption in habitations. Efforts have been made in improving the permeability performance of the different constructive elements, construction processes and ventilation systems, actively contributing to the increase in air tightness in buildings.

Hence comes the necessity, as to perform a correct evaluation of the envelope's constitutive elements, of knowing the parameters of air permeability and their representativeness on the total infiltration level.

However, there is a shortness of available studies that approach this subject and so, the main purpose of the work developed, is that it becomes a contribution to this area of expertise.

In order to obtain the referred parameters, the "Blower Door" mechanism was used, following the directives specified in the ISO standard 9972:2012.

The followed experimental campaign, through the use of pressurization/depressurization tests for different situations, allowed the characterization of the global air permeability of the buildings, as well as the building components. The trials were performed using the following pressure values: 10, 20, 30, 40 and 50 Pa.

It was also conducted the characterization of the global air changes rates, for the different cases, by the "*Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação*" – Regulation for the Energetic Performance of Habitation Buildings – and comparing each other with the results obtained via experimental trials.

With the conclusion of the study, it is of relevance that the hourly renovation value obtained through analytical conditions is always superior than the one obtained experimentally.

Also, it was found that the elements with higher contribution to the registered infiltrations are the admission grids and the window frames, with a weight close to 20 %.

With the results registry, measures can be taken in order to perfect some of the building components, as well as the development of a common evaluation method.

Key words: Air permeability, building components, blower door, pressurization test, air changes per hour (ach).

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1.INTRODUÇÃO	 1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO	2
 2.ESTADO DA ARTE	 5
2.1. VENTILAÇÃO	5
2.1.1. ENQUADRAMENTO	5
2.1.2. VENTILAÇÃO NATURAL	6
2.1.3. VENTILAÇÃO MECÂNICA	8
2.1.4. QUANTIFICAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE AR	10
2.2. PERMEABILIDADE AO AR	11
2.2.1. ENQUADRAMENTO	11
2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A PERMEABILIDADE AO AR	13
2.2.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS RESPONSÁVEIS PELA PERMEABILIDADE AO AR	16
2.3. ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO	23
2.3.1. CONCEITOS GERAIS	23
2.3.2. ABORDAGEM NORMATIVA	25
2.3.3. INCERTEZAS ASSOCIADAS AO ENSAIO COM PORTA VENTILADORA	30
2.3.4. RESULTADOS	31
2.4. RELAÇÃO RPH VS. RPH50	34
2.4.1. ENQUADRAMENTO	34
2.4.2. MÉTODO SIMPLIFICADO	34
2.4.3 ABORDAGEM LAWRENCE BERKLEY LABORATORY	35
2.4.4 VARIABILIDADE DO PARÂMETRO N	36
2.4.5. PERSPETIVA REH - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE VENTILAÇÃO	37
2.5. REQUISITOS DE ESTANQUIDADE AO AR	39
2.5.1. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO VS. PERMEABILIDADE AO AR	44
2.6. AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES	47

3.PROCEDIMENTO DE ENSAIO	51
3.1. SISTEMA PORTA VENTILADORA	51
3.2. INSTRUÇÕES BASE	53
3.2.1. PREPARAÇÃO DO ENSAIO	53
3.2.2. MONTAGEM DO EQUIPAMENTO	54
3.2.3. REALIZAÇÃO DO ENSAIO UTILIZANDO O <i>SOFTWARE FANTESTIC</i>	56
3.2.4. ELEMENTOS DE APOIO PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	58
4.CARATERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO	65
4.1. CASO DE ESTUDO 1	65
4.1.1. CARATERIZAÇÃO GERAL	65
4.1.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE	66
4.1.3. CLIMA	67
4.1.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RPH PELO NOVO REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO	67
4.2. CASO DE ESTUDO 2	69
4.2.1. CARATERIZAÇÃO GERAL	69
4.2.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE	71
4.2.3 CLIMA	71
4.2.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RPH PELO NOVO REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO	72
4.3. CASO DE ESTUDO 3	75
4.3.1. CARATERIZAÇÃO GERAL	75
4.3.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE	78
4.3.3 CLIMA	79
4.3.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RPH PELO NOVO REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO	79
4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS VALORES DE RPH	84
5.ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES	87
5.1. CASO DE ESTUDO 1	87
5.1.1. METODOLOGIA DE ANÁLISE	87
5.1.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS	92
5.1.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO EM CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO NORMAIS	94
5.1.4. CURVA CARACTERÍSTICA DOS COMPONENTES	94
5.1.5. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES	97
5.2. CASO DE ESTUDO 2	99
5.2.1. METODOLOGIA DE ANÁLISE	99

5.2.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	103
5.2.3. ANÁLISE RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	104
5.2.4. CURVA CARACTERÍSTICA DOS COMPONENTES.....	105
5.2.5. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES	108
6.CONCLUSÕES	111
6.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS.....	111
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	112
BIBLIOGRAFIA.....	115
ANEXOS	A.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Lógica para a correta seleção da taxa de ventilação adequada para controlo de poluição (Adaptado de Road, W., L.).....	6
Figura 2.2 - Fluxo de ar provocado pelo efeito do vento (Adaptado de Concannon P., 2002).	7
Figura 2.3 - Fluxo de ar provocado pelo efeito chaminé (Adaptado de Concannon P., 2002).....	7
Figura 2.4 - Impacto do efeito do vento e chaminé num sistema de ventilação natural.....	8
Figura 2.5 - Esquema de princípio de sistema de extração mecânica (Adaptado de Concannon P., 2002).	9
Figura 2.6 - Esquema de princípio de sistema de insuflação mecânica. (Adaptado de Concannon P., 2002).	9
Figura 2.7 - Esquema de princípio de sistema balanceado. (Adaptado de Concannon P., 2002).	10
Figura 2.8 - Taxa de fluxo de ar, em função de dados relativos a diferenciais de pressão registados, em ensaios de pressurização (Adaptado de ASHRAE, 2009).....	10
Figura 2.9 - Percursos típicos de escoamento de ar.	12
Figura 2.10 - Efeito da idade do edifício na sua permeabilidade. (Adaptado de Stephen, 2000 e Olivier, 1999).	14
Figura 2.11 - Influência do tipo de material utilizado nas paredes na permeabilidade de edifícios. (Adaptado de Stephen, 2000).	15
Figura 2.12 - Representação da combinação entre o efeito chaminé e o ensaio da porta ventiladora. (Adaptado de Quirouette, 2004).....	16
Figura 2.13 - Localização dos locais que promovem fugas de ar.....	22
Figura 2.14 - Sistema da porta ventiladora.	23
Figura 2.15 - Representação esquemática de um ensaio de estanquidade utilizando o sistema de porta ventiladora. Representação de um edifício em despressurização, caudal (Q) flui para fora da habitação. a) Pressão interior; b) Pressão exterior. (Adaptado de CETE de Lyon).....	24
Figura 2.16 - Esquema da contabilização do volume interno	32
Figura 2.17 - Dimensões do edifício. 1) Exterior; 2) Dimensão global interior; 3) Divisões interiores..	32
Figura 2.18 - Representação do fator climático C, nos EUA.	36
Figura 2.19 - Secção 1, folha de cálculo REH.	38
Figura 2.20 - Secção 2 e 3, folha de cálculo REH.	39
Figura 2.21 - Sugestão de relação entre os níveis de estanquidade e os valores de R_{ph50} (Adaptado de Concannon, 2002).....	45
Figura 2.22 - Valores típicos de estanquidade sugeridos para diferentes tipos de ventilação. Adaptado de <i>Building Regulations</i> (ODPM, 2006).	46

Figura 3.1 - Constituintes principais de um sistema de porta ventiladora. a) Ventilador; b) tecido estanque; c) caixilharia de alumínio; d) ventilador com anel colocado; e) tubos com sonda de pressão estática; f) manómetro; g) sistema com <i>software</i> .	52
Figura 3.2 - Ajuste da caixilharia à ombreira da porta selecionada para colocação do sistema.	54
Figura 3.3 - Colocação do tecido estanque na caixilharia.	54
Figura 3.4 - Colocação de fita adesiva na estrutura.	55
Figura 3.5 - Ventilador na posição final. a) Ventilador em posição para pressurização; b) Ventilador coberto para obtenção dos diferenciais de pressão com fluxo nulo.	55
Figura 3.6 - Ligações entre os vários componentes de ensaio. a) Ventilador; b) Medidor digital; c) Computador portátil.	56
Figura 3.7 - Dados de entrada. Informação relativa ao edifício.	57
Figura 3.8 - Resultados gerados pelo <i>software Fantestic</i> . Exemplo caso de estudo 2.	58
Figura 3.9 - Parte inicial da ficha de ensaio relativa ao edifício ensaiado.	59
Figura 3.10 - Dados de entrada solicitados pelo <i>software Fantestic</i> .	60
Figura 3.11 - Primeiro campo da secção de resultados da ficha de ensaio para registo de diferenciais de pressão.	61
Figura 3.12 - Dados finais de ensaio e resultados relativos aos fluxos obtidos.	61
Figura 3.13 - Listagem dos parâmetros caracterizadores da permeabilidade ao ar.	62
Figura 3.14 - Parte inicial ficha de ensaio método B.	63
Figura 3.15 - Caracterização da metodologia adotada por elemento. Resultados do ensaio.	63
Figura 3.16 - Parte final ficha de ensaio método B.	64
Figura 4.1 - Representação esquemática do edifício ensaiado (vista geral).	65
Figura 4.2 - Representação esquemática do edifício estudado. a) Vista posterior; b) Vista lateral esquerda e direita.	66
Figura 4.3 - Localização do edifício estudado.	66
Figura 4.4 - Fachadas do edifício. a) Fachada orientada a Nordeste; b) Fachada orientada a Sudoeste.	69
Figura 4.5 - Planta do apartamento ensaiado.	70
Figura 4.6 - Localização do apartamento estudado.	71
Figura 4.7 - Grelhas autorreguláveis aplicadas na caixa de estore.	73
Figura 4.8 - Fachada pertencente a dois dos edifícios do complexo habitacional de Lordelo.	75
Figura 4.9 - Alteração, pelos moradores, das soluções iniciais de ventilação. Adaptado de Machado, 2013.	77
Figura 4.10 - Localização do edifício estudado.	78
Figura 4.11 - Grelhas no estado normal de funcionamento.	80

Figura 4.12 – Grelhas com aplicação de fita adesiva.	80
Figura 4.13 - Abertura na lavanderia.	81
Figura 4.14 - Análise comparativa dos valores obtidos de Rph, através das diferentes metodologias.	84
Figura 4.15 - Análise comparativa dos valores obtidos de Rph, com consideração da área de abertura sugerida pela ferramenta de cálculo.	85
Figura 5.1 - Localização das selagens realizadas no edifício nos diversos ensaios.	89
Figura 5.2 - Selagem aplicada nas janelas no contorno da abertura e da moldura.	89
Figura 5.3 - Selagem aplicada no pavimento na interceção entre pilar e pavimento.	90
Figura 5.4 - Selagem aplicada ao longo da estrutura do cume ventilado.	90
Figura 5.5 - Relatório gerado com detalhes do edifício (condições de funcionamento).	90
Figura 5.6 - Gráfico representativo do número de leituras relativamente às diversas pressões induzidas (condições de funcionamento).	91
Figura 5.7 - Gráfico bi-logarítmico com representação dos valores de caudal em função das diversas pressões induzidas (condições de funcionamento).	91
Figura 5.8 - Resultados do ensaio apresentado no relatório (condições normais de funcionamento).	92
Figura 5.9 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar geradas através dos valores de caudais obtidos nos ensaios.	95
Figura 5.10 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar dos vários elementos da envolvente.	97
Figura 5.11 - Representação da influência de cada elemento da envolvente na ventilação do edifício.	98
Figura 5.12 - Comparação da influência dos elementos em estudo quando submetidos a um diferencial de pressão de 50 Pa com o resultado da média de todas as pressões.	98
Figura 5.13 - Acesso à lavanderia pela cozinha. Selagem aplicada à porta e postigo.	100
Figura 5.14 - Selagem aplicada às tomadas elétricas.	101
Figura 5.15 - Abertura existente na cozinha utilizada para exaustão.	101
Figura 5.16 - Grelha de extração localizada na casa de banho.	101
Figura 5.17 - Selagem aplicada às caixilharias e caixas de estore.	102
Figura 5.18 - Selagem aplicada às grelhas autorreguláveis aplicadas nas caixas de estore.	102
Figura 5.19 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar geradas através dos valores de caudais obtidos nos ensaios de pressurização.	106
Figura 5.20 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar dos vários elementos da envolvente, resultante dos ensaios.	108
Figura 5.21 - Representação da influência de cada elemento da envolvente na ventilação do edifício.	109

Figura 5.22 - Comparação da influência de cada elemento da envolvente, na ventilação do edifício, quando submetido a um diferencial de pressão de 50 Pa com o resultado da média de todas as pressões. 110

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Áreas de infiltração equivalente baseados em valores disponíveis na literatura. A área de infiltração é baseada numa pressão de referência de 4 Pa com coeficiente de escoamento (C) igual a 1.....	18
Quadro 2.2 - Tratamento das aberturas intencionais em função do método utilizado (ISO 9972:2012).	27
Quadro 2.3 - Incertezas associadas aos resultados dos ensaios (Adaptado de Retrotec).	31
Quadro 2.4 - Fatores de correção.	35
Quadro 2.5 - Condições aceitáveis de preparação e requisitos de ensaio de vários protocolos e legislação aplicada para o ensaio utilizando o sistema de porta ventiladora.	40
Quadro 2.6 - Especificações adicionais à norma EN 13829.	42
Quadro 2.7 - Requisitos dos valores de R_{ph50} para diversos países. (Adaptado de Retrotec).	43
Quadro 2.8 - Valores máximos recomendados para medição da estanquidade a uma pressão induzida de 50 Pa. Adaptado de Erhorn-Kluttig and Erhorn (2012).	46
Quadro 2.9 - Valores do indicador de permeabilidade q_{50} por tipo de utilização.	47
Quadro 2.10 - Permeabilidade das grelhas autorreguláveis (Adaptado de <i>M. Pinto</i> , 2011).	49
Quadro 2.11 - Permeabilidade das caixas de estore (Adaptado de <i>M. Pinto</i> , 2011).	49
Quadro 2.12 - Permeabilidade das janelas (Adaptado de <i>M. Pinto</i> , 2011).	49
Quadro 2.13 - Permeabilidade das grelhas de passagem das portas da cozinha e instalações sanitárias (Adaptado de <i>M. Pinto</i> , 2011).	50
Quadro 2.14 - Permeabilidade das portas interiores aos apartamentos (Adaptado de <i>M. Pinto</i> , 2011).	50
 Quadro 3.1 - Desempenho da gama de anéis disponíveis para o modelo <i>Retrotec 1000</i>	 51
 Quadro 4.1 - Características do edifício estudado.	 66
Quadro 4.2 - Valores da velocidade do vento e temperaturas interior e exterior por ensaio.	67
Quadro 4.3 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos ao enquadramento do edifício.	68
Quadro 4.4 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos à permeabilidade ao ar da envolvente.	68
Quadro 4.5 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos às aberturas de admissão de ar na envolvente.	68
Quadro 4.6 - Comparação entre os diferentes valores de R_{ph}	69
Quadro 4.7 - Características do apartamento ensaiado.	70

Quadro 4.8 - Informações relativas à direção e velocidade do vento, temperaturas interior e exterior por ensaio.	72
Quadro 4.9 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos ao enquadramento do edifício.	73
Quadro 4.10 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos à permeabilidade ao ar da envolvente.	74
Quadro 4.11 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos às aberturas de admissão de ar na envolvente.	74
Quadro 4.12 - Comparação entre os diferentes valores de Rph.	74
Quadro 4.13 - Características dos edifícios em estudo.	76
Quadro 4.14 - Descrição das alterações realizadas pelos ocupantes dos apartamentos nos diferentes sistemas de ventilação.	77
Quadro 4.15 - Valores médios da temperatura, velocidade e direção do vento para os diferentes dias de ensaio. Adaptado de Machado, 2013.	79
Quadro 4.16 - Casos de estudo em consideração de acordo com folha de cálculo fornecida pelo LNEC.	81
Quadro 4.17 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos ao enquadramento do edifício.	82
Quadro 4.18 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos à permeabilidade ao ar da envolvente.	82
Quadro 4.19 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos às aberturas de admissão de ar na envolvente.	83
Quadro 4.20 - Comparação entre os diferentes valores de Rph.	83
Quadro 4.21 - Análise comparativa dos valores obtidos de Rph, através das diferentes metodologias.	84
Quadro 5.1 - Listagem dos elementos construtivos e opções tomadas quanto à selagem para avaliação da permeabilidade por ensaio.	88
Quadro 5.2 - Listagem dos resultados obtidos através dos ensaios de despressurização.	93
Quadro 5.3 - Síntese dos parâmetros principais obtidos nos ensaios de despressurização.	94
Quadro 5.4 - Variação dos caudais de ar de acordo com diversos valores de pressão através das equações de cada ensaio.	94
Quadro 5.5 - Equações de permeabilidade ao ar dos elementos construtivos.	96
Quadro 5.6 - Listagem dos elementos construtivos e opções tomadas quanto à selagem para avaliação de permeabilidade por ensaio.	102
Quadro 5.7 - Listagem dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.	103
Quadro 5.8 - Síntese dos parâmetros principais obtidos nos ensaios de pressurização.	104

Quadro 5.9 - Variação dos caudais de ar de acordo com diversos valores de pressão através das equações de cada ensaio.	105
Quadro 5.10 - Equações de permeabilidade ao ar dos elementos construtivos.	107

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Δp - diferencial de pressão [Pa]

ΔT - diferencial de temperatura [°C]

A_E - área da envolvente [m²]

A_F - área útil [m²]

$A_{r,1}$ - área da fuga à pressão de referência 1 [cm²]

$A_{r,2}$ - área da fuga à pressão de referência 2 [cm²]

$C_{D,1}$ - coeficiente de escoamento utilizado para calcular $A_{r,1}$ [m³/ (h.Paⁿ)]

$C_{D,2}$ - coeficiente de escoamento utilizado para calcular $A_{r,2}$ [m³/ (h.Paⁿ)]

C_{env} - coeficiente de escoamento de ar [m³/ (h.Paⁿ)]

CFM - caudal escoado volumétrico [ft³/min]

C_L - coeficiente de infiltração de ar [m³/ (h.Paⁿ)]

ELA - área de infiltração equivalente [m²]

H_{edif} - altura do edifício [m]

H_{FA} - altura da fração [m]

n - expoente de escoamento [-]

N_{fach} - número de fachadas expostas ao exterior [-]

N_{ic} - necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (kWh/m².ano)

N_{vc} - necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (kWh/m².ano)

Q - caudal escoado [m³/h]

Q_{25} - caudal de ar escoado para um diferencial de 25 Pa [m³/s]

Q_{50} - caudal de ar escoado para um diferencial de 50 Pa [m³/s]

q_{50} - razão entre caudal escoado e área da envolvente a 50 Pa [m³/h/m²]

q_{75} - razão entre caudal escoado e área da envolvente a 75 Pa [m³/h/m²]

Q_{env} - Caudal de ar escoado através da envolvente [m³/h]

$Q_{r,2}$ - fluxo de escoamento a uma variação de pressão de referência [m³/s]

r - coeficiente de correlação [%]

$R_{ph, i}$ - renovações horárias estação de aquecimento [h⁻¹]

$R_{ph, v}$ - renovações horárias estação de arrefecimento [h⁻¹]

R_{ph50} - renovações por hora a 50 Pa [h⁻¹]

$R_{ph_{nat}}$ - renovações horárias a pressões normais [h⁻¹]

$R_{ph_{ref}}$ - renovações horárias edifício de referência [h⁻¹]

Te - temperatura exterior [°C]

Ti - temperatura interior [°C]

U - coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]

V - volume interior da habitação [m³]

\dot{V}_{50} - fluxo de ar a 50 Pa [m³/h]

w₅₀ - razão entre caudal de ar escoado e área útil [m³/h/m²]

AQS - Água Quente Sanitária

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATTMA - Air Tightness Testing and Measurement Association

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BER - Building Energy Rating

BRE - Building Research Establishment

CGSB - Canadian General Standards Board

EN - European Standard

EPB - *Energy* Performance of Buildings

EUA - Estados Unidos da América

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LBL - Lawrence Berkley Laboratory

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP - Norma Portuguesa

ODPM - Office of the Deputy Prime Minister

P- - Despressurização

P+ - Pressurização

PES - Pequeno Edifício de Serviços

QAI - Qualidade do ar interior

USACE - United States Army Corps of Engineers

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A permeabilidade ao ar assume-se como uma importante característica do edifício, sendo a sua influência bastante significativa na obtenção de qualidade do ambiente interior. O nível de aquecimento, a estratégia do sistema de ventilação, o grau de poluição do ar interior, o conforto acústico e por último, e com grande relevância, o desempenho energético do edifício, são influenciados pelo grau de permeabilidade apresentado pela envolvente.

Os sistemas de ventilação têm um papel importante na definição das condições higrotérmicas dos edifícios. Estes são absolutamente necessários para remoção de poluentes e humidade produzida, assegurando os níveis de oxigénio necessários para o metabolismo humano e garantindo um desempenho eficiente dos dispositivos de combustão.

No passado, a ventilação dos edifícios em Portugal, era assegurada pelo hábito de abrir janelas pelos moradores. No entanto, com as alterações no quotidiano das famílias, estas encontram-se durante longos períodos ausentes das suas casas, sendo negligenciada a necessidade de renovação do ar interior. Também o incremento da qualidade dos materiais utilizados na envolvente do edifício (Portas, caixilharias), assim como uma acentuada evolução nas técnicas e matérias utilizados na construção, provocaram uma grande diminuição das renovações de ar, reduzindo a qualidade do ar interior e proporcionando o aparecimento de condensações entre outras patologias associadas. Atualmente em Portugal, os sistemas de ventilação representam entre 30 % a 80 % do total da energia consumida pelos edifícios.

A quantificação das infiltrações através da envolvente é um processo complexo, pois é difícil identificar e caracterizar todas as aberturas que as possam provocar. A fim de ultrapassar esta dificuldade, os componentes de construção (por exemplo, janelas ou portas) são frequentemente testados em laboratório. Em Portugal, a permeabilidade destes elementos raramente foi testada.

Desta forma será imperativo proceder a uma correta avaliação dos elementos constituintes da envolvente relativamente à representatividade de cada um no grau de permeabilidade ao ar total apresentado. Será portanto uma mais-valia a caracterização e avaliação de componentes, tais como, portas, caixilharias, caixas de estore e grelhas.

Vários métodos quantitativos podem ser utilizados para a contabilização da permeabilidade ao ar dos componentes. O mais simples recorre a um ventilador (correntemente designado por porta ventiladora) para

induzir um diferencial de pressão entre o interior e exterior do compartimento, podendo ser obtidos os valores de vários indicadores, caraterizadores da permeabilidade ao ar, de determinado compartimento ou componente.

Devido à grande dificuldade na obtenção de dados publicados sobre a permeabilidade ao ar em habitações com caraterísticas construtivas e elementos semelhantes (e.g. caixilharias) para o parque habitacional em países mediterrânicos, foram realizados ensaios em algumas frações. Com o registo dos resultados poderão ser tomadas medidas tendo em vista o aprimoramento de alguns componentes da construção assim como o desenvolvimento de um método de avaliação comum.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os principais objetivos associados ao trabalho desenvolvido na presente dissertação são:

- Domínio da legislação vigente, à aplicação do ensaio com porta ventiladora, em Portugal e internacionalmente, prestando especial atenção às derivações adotadas por cada país;
- Obtenção de recomendações para níveis de estanquidade ao ar aceitáveis;
- Recomendações para a prática sobre a aplicação do ensaio;
- Aplicação do método a 3 casos de estudo;
- Caraterização experimental das taxas de renovações horárias globais, para os diferentes casos de estudo, através do ensaio com porta ventiladora e pelo Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação (REH);
- Validação da metodologia aplicada pelo REH através da comparação com os valores obtidos experimentalmente;
- Caraterização experimental e determinação do grau de influência dos diferentes elementos construtivos afetos aos diferentes casos de estudo;
- Recolha e interpretação dos resultados obtidos.

Devido à grande escassez de estudos realizados em habitações portuguesas, relativamente à avaliação da permeabilidade ao ar de edifícios e dos seus elementos constituintes, pretende-se que este trabalho represente um contributo nesta área muitas vezes subvalorizada.

Para além dos resultados dos ensaios pretende-se que o modelo adotado, para avaliação da influência de cada um dos elementos, possa ser utilizado futuramente.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

A presente dissertação divide-se em seis partes:

- No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura disponível alusiva ao tema ventilação, com apresentação dos vários sistemas (ventilação natural, mecânica e mista). É feita uma abordagem relativa ao procedimento referente à quantificação da permeabilidade ao ar, com identificação dos principais componentes responsáveis pelo registo de infiltrações e principais fatores de influência. Relativamente ao ensaio de pressurização é feita uma abordagem nacional e internacional da legislação em vigor para diferentes países, com especial atenção para a

norma ISO 9972:2012, atualmente em utilização, fazendo uma abordagem das condições, preparação e diferentes metodologias de ensaio. São abordados vários fatores com conotação ambígua na contabilização de alguns dados necessários para realização de ensaio e dado o respetivo esclarecimento. É feita uma correlação entre os diferentes sistemas de ventilação e resultados de ensaios esperados. É introduzido o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação e metodologia de cálculo para obtenção do valor de renovações por hora. Finalmente é apresentado um estudo realizado em Portugal em que a metodologia adotada foi semelhante à desenvolvida na presente tese para avaliação da estanquidade dos elementos construtivos dos diferentes casos de estudo;

- No capítulo 3 é abordado em detalhe o procedimento de ensaio utilizando o sistema da porta ventiladora. Estão descritas as instruções base relativas à preparação, montagem do equipamento, e a explicação do procedimento a seguir para obtenção de resultados recorrendo ao *software Fantestic*. Estão ainda disponíveis duas fichas de ensaio, estando uma delas direcionada para obtenção do valor de R_{ph50} global (Método A) e outra para avaliação da influência dos diversos elementos construtivos (Método B);
- No capítulo 4 é feita a descrição dos casos de estudo. Apresenta-se a caracterização geral dos edifícios sujeitos a ensaio (tipologia, sistemas de ventilação, soluções construtivas e dimensões), localização e descrição do espaço envolvente e ainda a caracterização das condições climatéricas registadas nos dias de ensaio. Por último é feito o cálculo do valor de R_{ph} pelo novo Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação.
- No capítulo 5 é feita a descrição da metodologia adotada, por caso de estudo, para a análise da permeabilidade dos componentes de acordo com a normalização aplicável. São apresentadas as estratégias adotadas das campanhas experimentais utilizadas nos vários ensaios através da porta ventiladora e também apresentados os diversos parâmetros obtidos caracterizadores da permeabilidade ao ar. A partir destes são determinadas as equações de permeabilidade para os vários elementos a estudo terminando com a representação gráfica do peso de cada um dos componentes no valor total de escoamentos registados.
- No capítulo 6 encontram-se resumidas as conclusões fundamentais, fruto da análise dos vários casos de estudo.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. VENTILAÇÃO

2.1.1. ENQUADRAMENTO

Existe um grande número de características de uma habitação que podem comprometer a qualidade do ar interior (QAI). A concentração de poluentes surge de um variado número de fontes, como os materiais utilizados na construção do edifício, os bioefluentes libertados pelos próprios utilizadores e o ar que se encontra no seu interior são fatores responsáveis pelo decréscimo da qualidade do ar. Também os gases resultantes da combustão dos diversos aparelhos instalados na habitação, tais como esquentadores a gás, exigem cuidados acrescidos para que seja garantida a segurança e saúde dos habitantes.

Em suma, todos os edifícios necessitam de ventilação adequada devido:

- Respiração humana;
- Saúde e conforto dos ocupantes;
- Controlo de humidade e condensação;
- Aparelhos de combustão;
- Diluição e eliminação de poluentes do ar.

Ventilação, por definição, é a troca de ar que se encontra dentro da habitação por ar fresco, relativamente limpo, proveniente do exterior. Esta renovação ocorre devido a cursos de ar que se encontram distribuídos pela envolvente do edifício (usualmente referida como infiltração) ou devido a trajetos predefinidos para a função (usualmente referidos como ventilação).

A ventilação é assim um mecanismo que se assume de enorme importância, sendo imperativo que esta seja assegurada nas habitações por um variado número de razões, estando diretamente relacionadas com o conceito de qualidade do ar interior (QAI). A lógica para uma ventilação ótima encontra-se exemplificada na Figura 2.1. É assim importante garantir a renovação de ar adequada para que sejam cumpridos os requisitos mínimos de salubridade. Isto torna-se possível se estiver garantido o número de renovações de ar adequado para o espaço habitacional em causa.

O correto valor de renovações de ar por hora, (Rph) proporcionará um ambiente saudável, remoção de poluentes que se formam no ambiente interior, níveis de oxigénio ótimos necessários para a combustão de aparelhos e que garantam o nível de oxigénio necessário para o natural metabolismo humano.

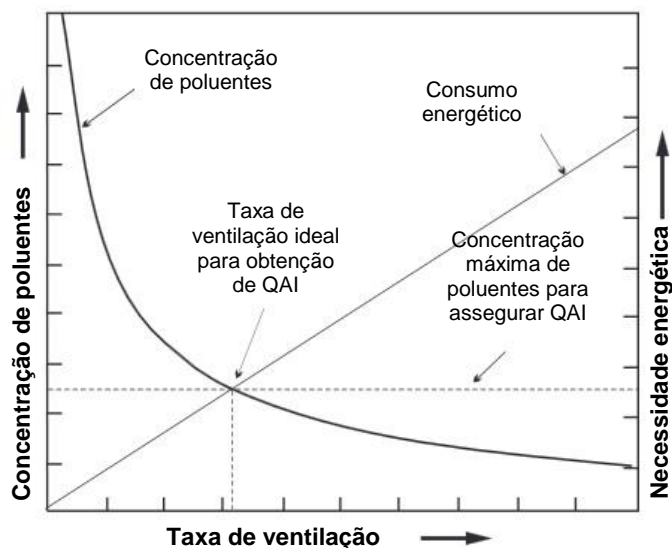


Figura 2.1 – Regulação do sistema de ventilação em função da qualidade do ar interior (Adaptado de Road, W., L.).

2.1.2. VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural depende de duas forças motrizes: do vento e do efeito chaminé. Ambas apresentam variações consideráveis ao longo do tempo e dependem do local onde está inserida a habitação. Estes dois aspetos tornam difícil a correta contabilização das taxas de ventilação.

Pressão do vento: A incidência do vento na envolvente do edifício irá provocar que várias áreas do edifício apresentem pressão positiva enquanto que outras pressão negativa. Este diferencial de pressões promove as movimentações de ar pelo edifício, sendo que esta movimentação faz-se a partir dos locais com elevada pressão para os de menor pressão. Na Figura 2.2 é perceptível o modo como se processa esta movimentação de ar.

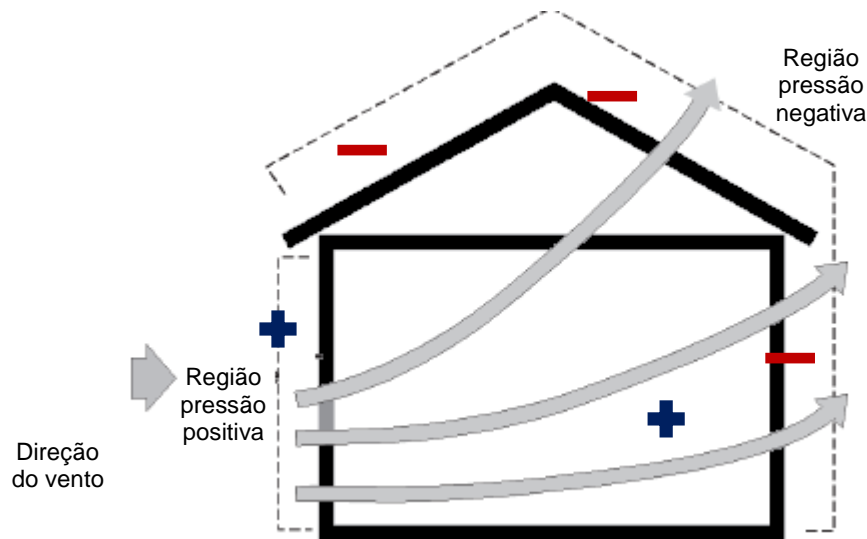


Figura 2.2 - Fluxo de ar provocado pelo efeito do vento (Adaptado de Concannon P., 2002).

Efeito chaminé: A movimentação das massas de ar dá-se devido à diferença de temperaturas verificada entre o ar interior e exterior. Tipicamente a massa de ar flui para o interior do edifício a um nível inferior, sendo extraída pelo nível superior, tal como se pode observar na Figura 2.3. Estas correntes de ar resultam de massas volúmicas distintas.

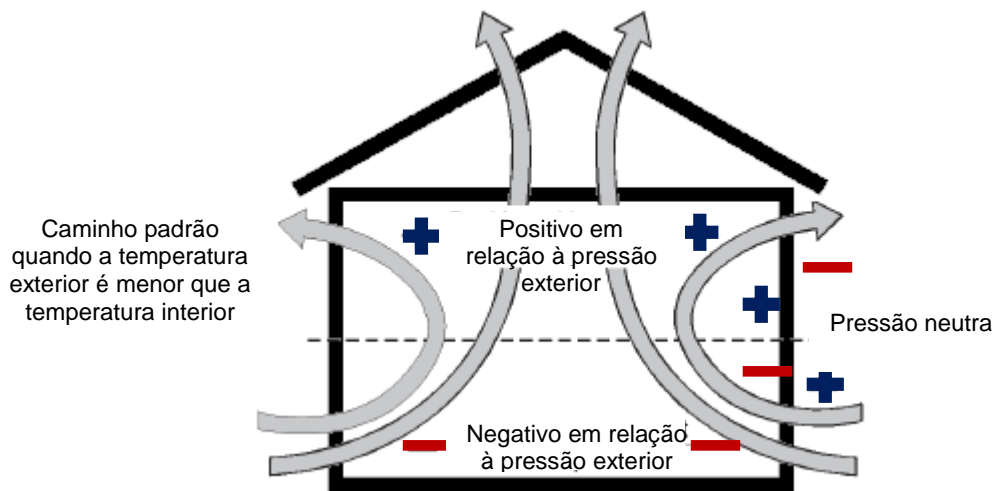


Figura 2.3 - Fluxo de ar provocado pelo efeito chaminé (Adaptado de Concannon P., 2002).

Estas duas forças podem também atuar em conjunto, aumentando a taxa de ventilação, ou por oposição diminuindo-a.

Na Figura 2.4 pode-se constatar que para velocidades superiores a 3m/s as forças provocadas pelo efeito do vento têm um grande impacto em sistemas de ventilação natural.

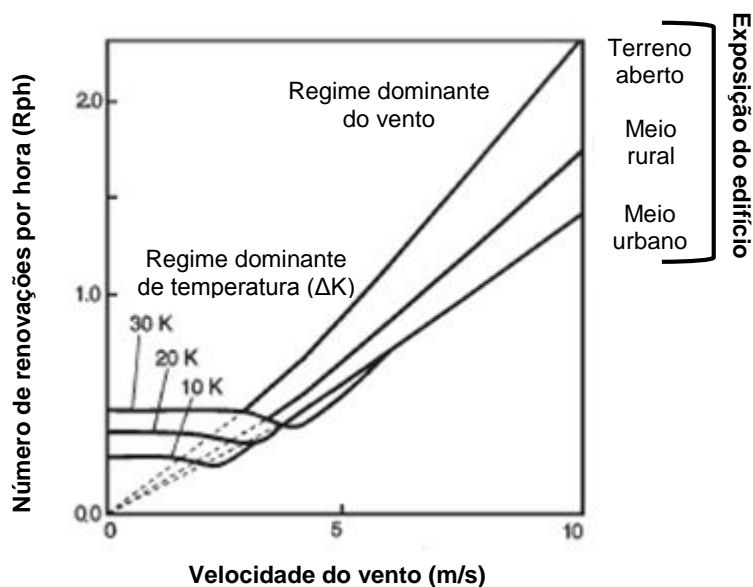


Figura 2.4 - Impacto do efeito do vento num sistema de ventilação natural (Adaptado de Concannon P., 2002).

Em Portugal a norma NP 1037-1 descreve em pormenor quais as especificações técnicas a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural dos edifícios de habitação, para que cumpram a sua função.

2.1.3. VENTILAÇÃO MECÂNICA

Este tipo de ventilação oferece um melhor e mais eficaz controlo dos valores de ventilação comparado com os sistemas de ventilação natural. No entanto é necessária energia adicional para que o ar seja conduzido de forma eficiente pelo edifício.

Este tipo de ventilação pode ser dividido em 3 subsistemas:

Extração mecânica: Neste tipo de extração, representado na Figura 2.5, o ar é extraído do edifício criando uma pressão negativa, promovendo assim a entrada de ar novo através de elementos permeáveis ou aberturas próprias na fachada.

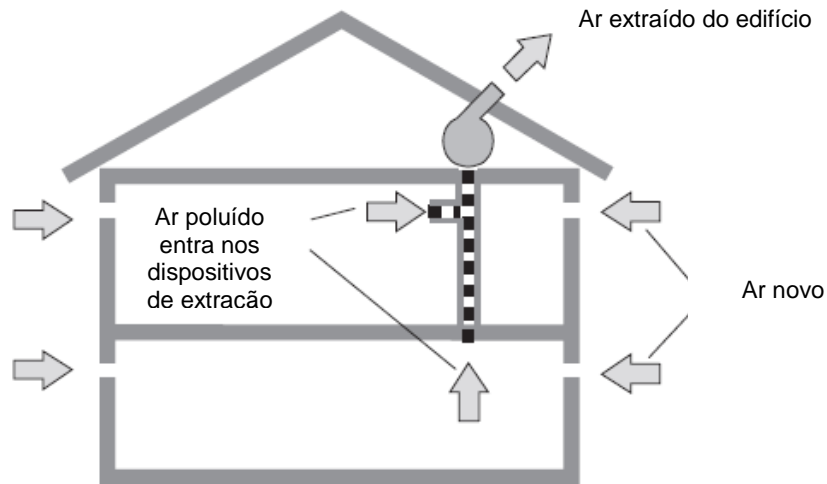


Figura 2.5 - Esquema de princípio de sistema de extração mecânica (Adaptado de Concannon P., 2002).

Insuflação mecânica: O ar é fornecido através do uso de um ventilador de insuflação, provocando a pressurização da habitação criando-se uma pressão positiva dentro desta.

O fluxo de ar é assim extraído através de aberturas (controladas ou não) tal como pode ser observado na Figura 2.6.

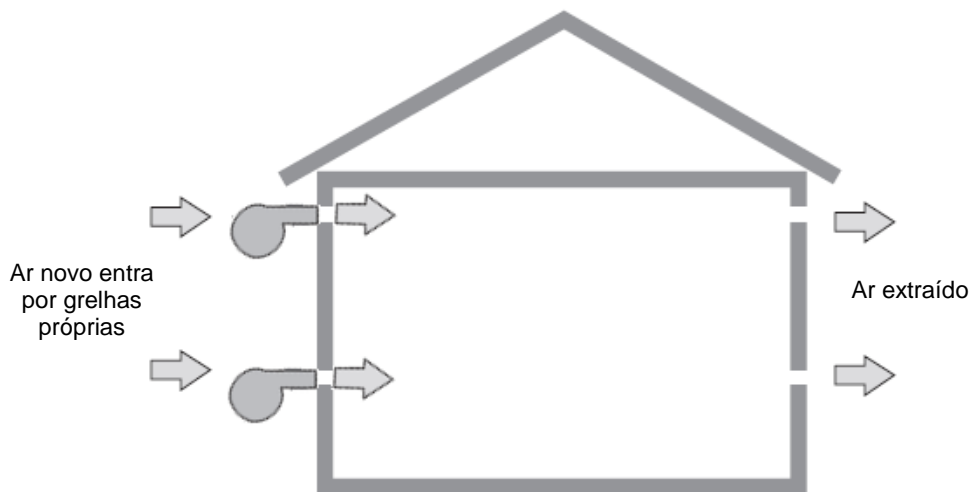


Figura 2.6 - Esquema de princípio de sistema de insuflação mecânica. (Adaptado de Concannon P., 2002).

Sistema balanceado: Consiste na conjugação de sistemas de insuflação e extração independentes. O edifício encontra-se equipado com ventiladores de admissão e extração, Figura 2.7. O sistema de admissão representa cerca de 90-95 % do sistema de extração produzindo uma ligeira despressurização do edifício, destinando-se a prevenir infiltrações de ar indesejáveis.

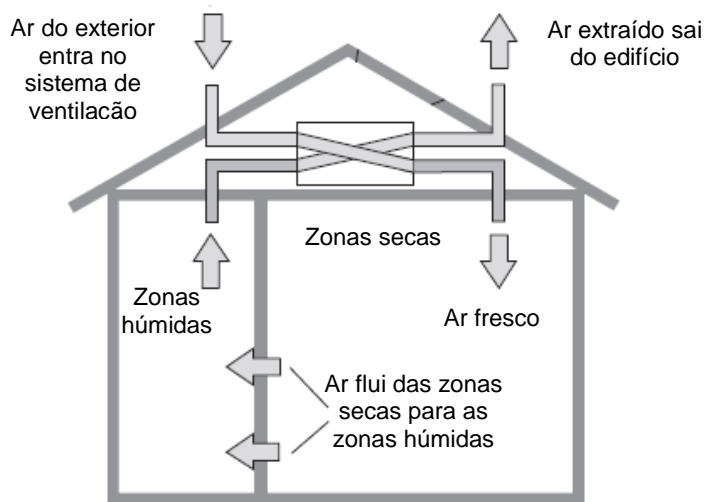


Figura 2.7 - Esquema de princípio de sistema balanceado. (Adaptado de Concannon P., 2002).

2.1.4. QUANTIFICAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE AR

A infiltração de ar que ocorre nos edifícios pode ser medida através de ensaios de pressurização (geralmente designado por ensaio com porta ventiladora). Este tipo de ensaio é relativamente rápido e não dispendioso, caracterizando a envolvente do edifício relativamente ao seu nível de estanqueidade independentemente das condições meteorológicas (ASHRAE, 2001). O gráfico típico com representação dos valores de caudal em função das diversas pressões induzidas de um ensaio de pressurização encontra-se representado na Figura 2.8.

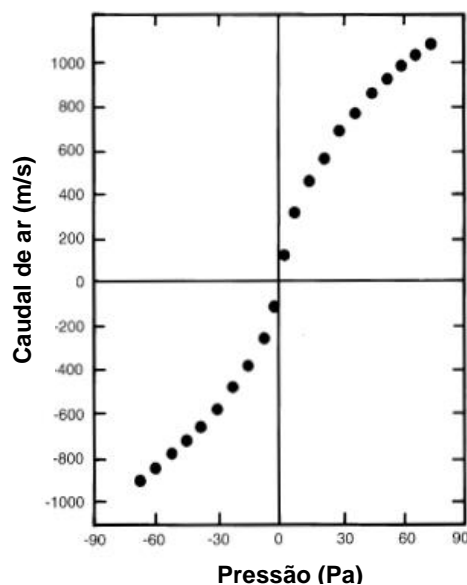


Figura 2.8 - Taxa de fluxo de ar, em função de dados relativos a diferenciais de pressão registados, em ensaios de pressurização e depressurização (Adaptado de ASHRAE, 2009).

Neste procedimento, um ventilador ou ventoinha é instalado numa porta ou janela induzindo um diferencial de pressão, relativamente elevado e uniforme, em toda a envolvente do edifício (ASTM E779:2003, ASTM 1827:2007, ISO 9972:2012). O fluxo de ar necessário para manter este diferencial é medido e registado, notando que quanto mais permeável for o edifício, maior será o fluxo de ar necessário para induzir um diferencial de pressão entre o interior e o exterior.

A taxa de fluxo de ar é geralmente medida utilizando várias pressões que tipicamente variam entre 10 Pa e 75 Pa. Por conseguinte os resultados do teste devem consistir em várias combinações destes diferenciais de pressão e em registos das taxas de fluxo de ar. Os pontos observados caracterizam a permeabilidade ao ar de um edifício sendo geralmente convertidos num valor único que representa a estanqueidade do edifício.

Existem várias formas de contabilizar a estanqueidade ao ar de um edifício, sendo que a maior parte relaciona os resultados recolhidos numa curva que traduz a relação entre caudais de ar (Q) e as diferenças de pressão (Δp) em determinada abertura do edifício.

As aberturas verificadas na envolvente de um edifício apresentam diferentes geometrias. Cada uma destas aberturas pode ser descrita pela equação 2.1, habitualmente designada por Lei da Potência:

$$Q = c(\Delta p)^n \quad (2.1)$$

Onde: Q = Caudal escoado, em m^3/h ;

c = Coeficiente de escoamento, em $m^3/(h \cdot Pa^n)$;

n = Expoente de escoamento;

Δp = Diferencial de pressão (Pa).

Walker, S. et al. (1997) demonstrou que para aberturas na envolvente do edifício ao longo do intervalo registado de pressões que atuam durante o processo de infiltração, n é constante. Um valor típico para o expoente de escoamento é cerca de 0,65.

2.2. PERMEABILIDADE AO AR

2.2.1. ENQUADRAMENTO

Nesta secção encontram-se sumariados alguns dos estudos mais relevantes, que traduzem o comportamento dos edifícios consoante o nível de permeabilidade. Antes de proceder à revisão do que já se sabe sobre este assunto, serão abordados os pontos-chave do papel representado pela permeabilidade ao ar na compreensão do processo de ventilação.

A permeabilidade ao ar é importante num variado número de perspetivas, mas a sua maioria relaciona-se com o fato de ser esta a propriedade da construção fundamental que traduz os impactos causados pelas infiltrações.

Existem várias definições para este conceito, mas fundamentalmente, infiltração é o movimento do ar através de frinchas, conexões, fendas ou outras aberturas acidentais na envolvente do edifício (Younes *et al.*, 2011). Na Figura 2.9 encontram-se demonstrados os principais percursos das infiltrações de ar num edifício.

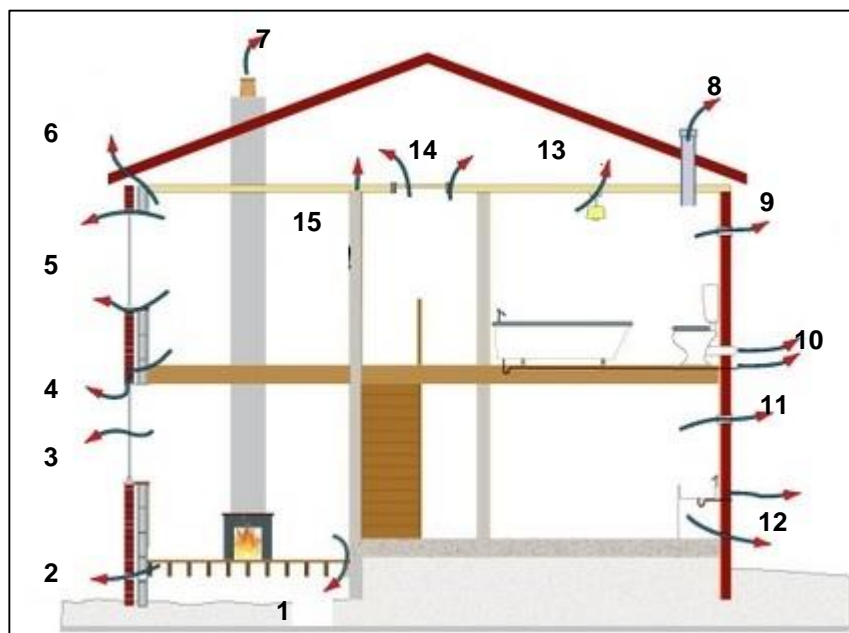


Figura 2.9 - Percursos típicos de escoamento de ar.

- | | |
|---|--|
| 1- Frinchas existentes em pisos de madeira | 9- Parede de ventilação nas casas de banho |
| 2- Grelhas de ventilação posicionadas no piso | 10- Frinchas nas tubagens |
| 3- Janelas e portas com escoamento | 11- Parede de ventilação na cozinha |
| 4- Percursos de escoamento através do pavimento/ teto | 12- Frinchas nas tubagens |
| 5- Frinchas existentes nas caixilharias | 13- Frinchas existentes nas aberturas para iluminação; |
| 6- Ligação entre parede e teto | 14- Abertura sótão. |
| 7- Chaminé | 15- Ligação entre parede e teto |
| 8- Condução de ventilação no teto | |

A humidade que surge devido ao impacto causado pelas infiltrações de ar, a longo prazo, compromete o desempenho dos materiais de construção e a integridade estrutural do edifício. Para além deste facto, este fluxo provoca impacto na qualidade do ar interior (QAI) proporcionando a dispersão de poluentes (Lstiburek *et al.*, 2002).

Em estruturas muito permeáveis, as infiltrações de ar, levam ao aumento das transferências de calor, problemas de difusão de vapor de água e a uma redução no desempenho do isolamento térmico instalado (*Silberstein and Hens, 1996*).

Ainda mais importante que os fatores anteriormente mencionados, a infiltração, tem um profundo impacto na eficiência energética do edifício, ou seja, taxas de infiltração elevadas irão provocar desperdícios e/ou consumos excessivos de energia, tornando os sistemas de aquecimento/ arrefecimento e sistemas de ventilação ineficazes, resultando num ambiente interior termicamente desconfortável (*Liddament, 1986*).

Os problemas energéticos bem como as exigências de qualidade do ar, nos dias de hoje, fazem da permeabilidade ao ar um dos fatores principais a ter em conta, não só em edifícios existentes mas também na fase de projeto de novas edificações. Estima-se que a infiltração causada pelo nível de permeabilidade da envolvente de um edifício é responsável por 25 % a 50 % de perdas de eficiência energética nos edifícios residenciais e comerciais (*Jokisalo et al, 2008; Kirkwood, 1977; Nevrala and Etheridge, 1977*). *Caffey, 1979* atribuiu 40 % da quota de aquecimento/arrefecimento ao fator infiltração.

No entanto, edifícios com boa estanquidade ao ar, mas sem um sistema de ventilação, são tão maus como edifícios com infiltrações de ar, devido à elevada higrometria que podem apresentar (*Green Building Advisor, 2013*). "A permeabilidade ao ar de um edifício é fundamental, é um dos pilares de um edifício energeticamente eficiente. A permeabilidade pode até ser mais importante que o isolamento térmico. Um edifício muito permeável, comparado com um estanque, igualmente isolado termicamente, pode ter até cinco vezes mais perdas de calor" (*Levenson, 2013*).

Será então importante conhecer quais os fatores e os principais elementos responsáveis pela permeabilidade ao ar.

2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A PERMEABILIDADE AO AR

A permeabilidade ao ar é influenciada por um elevado número de fatores. Sendo os que mais se destacam, definidos em seguida.

Ano de Construção

Até determinado ponto a permeabilidade da envolvente de um edifício é influenciada pelo ano em que foi construído. Nos países onde estão estabelecidos requisitos mínimos, como o Canadá, Suécia e Suíça, as novas habitações tendem a ser mais herméticas que habitações antigas. Em países com requisitos de estanquidade com menor número de exigências, como o Reino Unido, a tendência para as construções mais recentes serem mais estanques que as antigas é quase inexistente. Estas conclusões encontram-se sustentadas pelo estudo realizado, em 1990, pelo grupo *BRE (Building Research Establishment)* (*Stephen, 2000*), onde é sugerido que habitações construídas no início do século 20 são tão estanques como aquelas construídas desde a década de 80. Na Figura 2.10 encontra-se representado o resultado destes estudos onde se pode visualizar o efeito deste fator na estanquidade apresentada pelos edifícios em diferentes países.

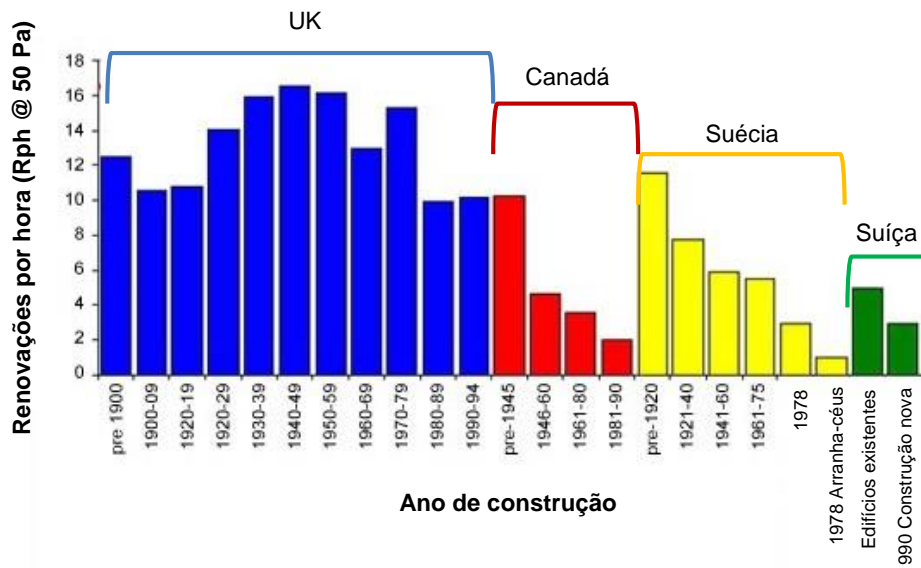


Figura 2.10 - Efeito da idade do edifício na sua permeabilidade. (Adaptado de Stephen, 2000 e Olivier, 1999).

Por outro lado *Kronvall e Boman, 1993*, não encontraram razões para considerar o ano de construção um fator determinante. Outro estudo realizado por *Juodis, 2000* e *Hill, 2001*, na Lituânia em 33 edifícios multifamiliares provou exatamente o contrário. Esta diferença poderá ser explicada pelo facto do estudo feito por *Kronvall e Boman, 1993*, ter sido realizado na Suécia, onde as habitações obedecem a requisitos muito específicos de construção.

Tipo de Construção

A permeabilidade ao ar é fortemente influenciada pelo tipo de construção. Teoricamente, certos tipos de construção são intrinsecamente mais herméticos. Por exemplo, alvenaria rebocada e estruturas em betão tendem a ser mais estanques do que estruturas em madeira ou aço (*Olivier, 1999*). Estas conclusões foram retiradas a partir de testes de pressurização realizados numa vasta gama de habitações na Noruega e Suécia. Os ensaios indicaram que as habitações construídas a partir de betão são menos permeáveis que as de alvenaria e, por sua vez, mais estanques que as de envolvente em madeira.

Por outro lado, no Reino Unido, ensaios realizados pelo grupo *BRE* (*Stephen, 2000*), em alvenarias com caixa-de-ar, demonstraram elevados níveis de permeabilidade, estando representado os valores alcançados na Figura 2.11.

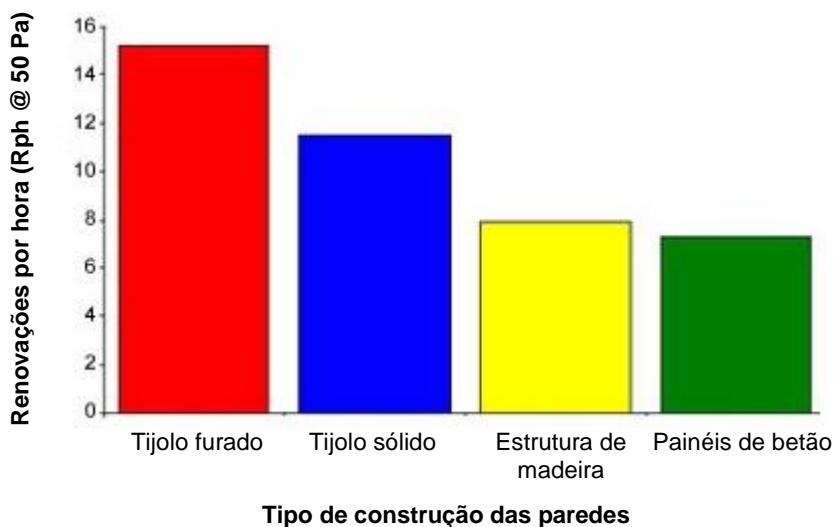


Figura 2.11 - Influência do tipo de material utilizado nas paredes na permeabilidade de edifícios. (Adaptado de Stephen, 2000).

Num estudo realizado por *Shaw, 1991*, no Canadá, ensaios realizados em 4 edifícios com diferentes tipos de construção das paredes demonstraram que os resultados alcançados não apresentam diferenças significativas. Este facto poderá ser explicado devido ao valor da estanquidade ser sobretudo dependente do quão bem aplicada e posicionada se encontra a barreira para vapor. *Lundin, 1981*, descreve que existem fugas de ar através da barreira para vapor em paredes situadas entre habitações. Para evitar esta situação será ideal que estas paredes devam estar continuamente ligadas ao interior das paredes exteriores, por forma a garantir uma barreira contínua.

Número de Pisos

Existem alguns estudos que apoiam que o número de pisos tem influência na estanquidade de um edifício. Investigação realizada por *Sherman e Dickerhoff, 1998*, com uma base de dados com quase 13 mil medições, sugere que as habitações com vários andares são mais permeáveis do que habitações térreas. Aproximadamente 56 % das medições realizadas foram em edifícios multifamiliares, o que indicou que estas apresentam um incremento no registo de infiltrações em cerca de 11 % do que edifícios unifamiliares. Resultados semelhantes foram também registados no Canadá (*Allen, 1985*).

Medições mais recentes realizadas por *Barles e Boulanger, 2000*, em França e por *Juodis, 2000*, na Lituânia, incluíram a análise de alguns arranha-céus residenciais, o que voltou a confirmar que os apartamentos localizados nos últimos pisos apresentam maior permeabilidade ao ar que aqueles situados em níveis mais baixos.

Este fenómeno pode ser justificado como consequência do efeito chaminé. Sendo este um fenómeno impulsionado pela temperatura, quando o ar interior se encontra mais quente que o exterior tende a subir. Este efeito produz uma diferença na pressão do ar entre o espaço interior e o ambiente exterior. Estas diferenças de pressão levam a que o ar interior saia através das aberturas não intencionais nas partes

superiores do edifício. Este fenómeno quando associado ao ensaio de pressurização, utilizado para avaliar a permeabilidade da envolvente dos edifícios, torna-se mais evidente. Este efeito encontra-se explicada na Figura 2.12.

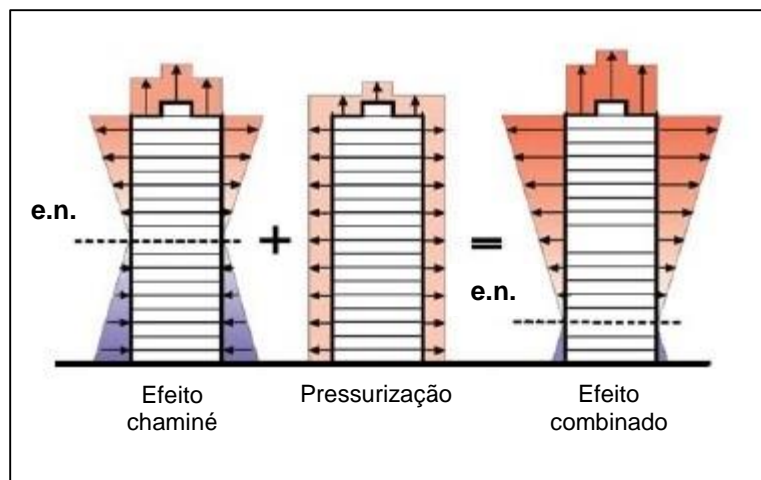


Figura 2.12 - Representação da combinação entre o efeito chaminé e o ensaio da porta ventiladora. (Adaptado de Quirouette, 2004).

Este tipo de testes são particularmente difíceis de realizar pois necessitam de livre acesso a todas as unidades do edifício assim como grande cooperação entre inquilinos e proprietários.

2.2.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS RESPONSÁVEIS PELA PERMEABILIDADE AO AR

Tal como já foi referido anteriormente, infiltração ao ar traduz-se pelas trocas realizadas do ar proveniente do exterior com o interior através de aberturas existentes na envolvente do edifício.

Janelas e portas não estanques, fendas entre a casa e as fundações e o mau isolamento em torno das instalações elétricas e tubagens são fontes típicas de infiltrações de ar.

Os elementos típicos, onde deve ser verificada a existência de infiltração de ar, incluem:

- Tomadas, interruptores, candeeiros de teto e parede;
- Pormenores das janelas e portas, verificando se estas se encontram corretamente ajustadas;
- Ombreiras e caixas de estore;
- Rodapés;
- Chaminés e lareiras;
- Alçapão do sótão e cave;
- Furos em paredes e chão devido a tubagens e instalações elétricas.

Será portanto vantajoso quantificar qual a contribuição que cada elemento construtivo tem na quantidade de ar trocado com o exterior. Foram realizados diversos estudos, que pretendem dar resposta a esta questão,

sendo possível assim realizar uma hierarquia relativamente à contribuição de cada componente para estas perdas.

Dickerhoff et al., 1982, *Harrje e Born*, 1982, estudaram as fugas de ar de componentes e sistemas constituintes dos edifícios. A sequência seguinte resume os pesos atribuídos a cada um dos elementos construtivos analisados:

- Paredes: 18 % a 50 %, com uma média de 35 %. Tanto as paredes interiores como exteriores contribuem para a permeabilidade da estrutura. Fugas entre o pavimento e as fundações, tomadas elétricas, perfurações para tubagens;
- Tetos: 3 % a 28 %, com uma média de 18 %. Iluminação embutida, perfurações elétricas;
- Sistemas de aquecimento/ arrefecimento: 3 % a 28 %, com uma média de 18 %. Esta categoria representa fugas de ar em trajetos de ar condicionado, aquecimento central e sistemas de ventilação;
- Janelas e portas: 6 % a 22 %, com uma média de 15 %. A infiltração/ fuga de ar em janelas é provocada pelo tipo de janela e não pela idade (*Weidt*, 1979). É ainda importante referir que estas percentagens representam a infiltração através de falhas e fendas nas portas e janelas, e não devido à sua abertura, para passagem, por exemplo;
- Lareira: 0 % a 30 %, com uma média de 12 %. Esta percentagem representa as fugas que acontecem enquanto a lareira não se encontra em utilização;
- Conduitas de ventilação em espaços fechados: 2 % a 12 % com uma média de 5 %;
- Difusão através das paredes: <1 %. A difusão, em comparação com infiltração através dos furos e outras aberturas da estrutura, não é um mecanismo de fluxo importante. A uma pressão de 5 Pa, a permeabilidade dos materiais do edifício produzem uma taxa de renovação de ar por difusão menor que 0.01 Rph.

No Quadro 2.1 estão descritas as áreas de fuga eficaz para uma vasta variedade de elementos da construção a uma pressão de 4 Pa (*Colliver et al*, 1992.). Os valores apresentados na tabela apresentam resultados em termos de área por unidade de componente. Estas áreas podem ser adaptadas para diferentes pressões de referência, taxas de fluxo de ar, ou coeficientes de fluxo, utilizando as equações 2.2 até 2.5. Este Quadro pode ser utilizado para estimar a área total de escoamento de ar do edifício se os dados de ensaio não estiverem disponíveis. Para obter esta área basta multiplicar as dimensões ou o número total de ocorrências de cada elemento construtivo pela designação adequada apresentada na tabela. O somatório de todos os elementos do edifício fornece o valor da área total de fugas de ar.

Quadro 2.1 - Áreas de infiltração equivalente baseados em valores disponíveis na literatura. A área de infiltração é baseada numa pressão de referência de 4 Pa com coeficiente de escoamento (C) igual a 1.

Elemento Construtivo	Un.	M.E.	Mín.	Máx.	Elemento Construtivo	Un.	M.E.	Mín.	Máx.
Cobertura:					Aberturas para Tubagem e passagem de fios:				
Plana	cm ² /m ²	1.8	0.79	2.8	Não Calafetadas	cm ² /un	6	2	24
Inclinada	cm ² /m ²	0.19	0.046	0.19	Calafetadas	cm ² /un	2	1	2
Teto:					Aberturas para ventilação:				
Sistema de iluminação embutido	cm ² /un	10	1.5	21	Casa de banho com abafador aberto	cm ² /un	10	2.5	20
Ventoinha teto	cm ² /un	31	28	31	Casa de banho com abafador fechado	cm ² /un	20	6.1	22
Sistema de iluminação não embutido	cm ² /un	0.82			Máquina de secar com abafador	cm ² /un	3	2.9	7
					Máquina de secar sem abafador	cm ² /un	15	12	34
Chaminé:	cm ² /un	29	21	36	Cozinha com abafador aberto	cm ² /un	40	14	72
					Cozinha com abafador fechado	cm ² /un	5	1	7
Cave ou sótão não habitável:					Paredes exteriores:				
Espaço geral	cm ² /m ²	10	8	17	Betão moldado in situ	cm ² /m ²	0.5	0.049	1.8
Ventiladores de 200 por 400 mm	cm ² /un	129			Parede dupla em tijolos de cerâmica, rebocada	cm ² /m ²	0.68	0.05	2.3
Caixilharia/moldura da porta:					Painél de betão pré fabricado	cm ² /m ²	1.2	0.28	1.65
Geral	cm ² /un	12	2.4	25	Blocos de betão de baixa densidade, não rebocado	cm ² /m ²	3.5	1.3	4
Em alvenaria, não calafetada	cm ² /m ²	5	1.7	5	Blocos de betão de baixa densidade, pintados ou com estuque (estucados)	cm ² /m ²	1.1	0.52	1.1
Em alvenaria calafetada	cm ² /m ²	1	0.3	1	Blocos de betão de alta densidade, não rebocado	cm ² /m ²	0.25		
Em madeira, não calafetada	cm ² /m ²	1.7	0.6	1.7	Barreira contínua de infiltração de ar	cm ² /m ²	0.15	0.055	0.21
Em madeira, calafetada	cm ² /m ²	0.3	0.1	0.3	Revestimento rígido	cm ² /m ²	0.35	0.29	0.41
Ligação entre moldura da porta e parede (trim)	cm ² /mlf	1			Moldura de janelas:				
Batente da porta	cm ² /mlf	8	7	10	Alvenaria, não calafetada	cm ² /m ²	6.5	5.7	10.3
Soleira da porta	cm ² /mlf	2	1.2	24	Alvenaria, calafetada	cm ² /m ²	1.3	1.1	2.1
Portas:					Madeira, não calafetada	cm ² /m ²	1.7	1.5	2.7

Em sótão ou cave, não calafetada	cm ² /un	30	10	37	Madeira, calafetada	cm ² /m ²	0.3	0.3	0.5
Em sótão ou cave, calafetada	cm ² /un	18	8	18.5					
Sótão com entrada pelo pavimento (escadas desdobráveis), não calafetada	cm ² /un	44	23	86	Janelas:				
Sótão com entrada pelo pavimento (escadas desdobráveis), calafetada	cm ² /un	22	14	43	Projetante de eixo horizontal superior, não calafetada	cm ² /m ²	1.6	0.8	2.4
Sótão com entrada pelo pavimento (escadas desdobráveis), com caixa isolante	cm ² /un	4			Projetante de eixo horizontal superior, calafetada	cm ² /m ²	0.8	0.4	1.2
Sótão sobre garagem não climatizada e não ventilada	cm ² /un	0	0	0	De abrir francesa, não calafetada	cm ² /mlf	0.24	0.1	3
Dupla, não calafetada	cm ² /m ²	11	7	22	De abrir francesa, calafetada	cm ² /mlf	0.28		
Dupla, calafetada	cm ² /m ²	8	3	23	Janela de correr horizontal (ambas móveis), não calafetada	cm ² /mlf	1.1	0.019	3.4
Elevador (para pessoas)	cm ² /un	0.26	0.14	0.35	Janela de correr horizontal (ambas móveis), de madeira, calafetada	cm ² /mlf	0.55	0.15	1.72
Elevador (geral/média)	cm ² /mlf	0.31	0.23	1.5	Janela de correr horizontal (dupla), de alumínio, calafetada	cm ² /mlf	0.72	0.58	0.8
Porta de correr (interior)	cm ² /un	14			Janela de correr vertical (dupla), não calafetada, ambas as partes correm	cm ² /mlf	2.5	0.86	6.1
Porta interior (escadas)	cm ² /mlf	0.9	0.25	1.5	Janela de correr vertical (dupla), calafetada, ambas as partes correm	cm ² /mlf	0.65	0.2	1.9
Abertura da caixa de correio	cm ² /mlf	4			Jalousie (conjunto de folhas do tipo pivotante)	cm ² /un	0.79	0.44	1
De correr, de vidro para exterior (para varanda ou pátio)	cm ² /un	22	3	60	Janela de correr horizontal (dupla), não calafetada, esquerda fixa	cm ² /lms	3.38		
De correr, de vidro para exterior (para varanda ou pátio)	cm ² /m ²	5.5	0.6	15	Janela de correr horizontal (dupla), alumínio, parte esquerda fixa	cm ² /lms	0.471	0.009	2.06
De correr, de vidro para exterior (para varanda ou pátio) com vidro duplo	cm ² /un	6	3	6.2	Janela de correr horizontal (dupla), madeira, parte esquerda fixa	cm ² /lms	0.44	0.27	0.99
Porta de abrir só numa direção, não calafetada	cm ² /un	21	12	53	Janela de correr horizontal (dupla), revestimento de madeira, parte esquerda fixa	cm ² /lms cm ² /lms	0.64	0.54	0.81

Porta de abrir só numa direção, calafetada	cm ² /un	12	4	27	Janela de correr vertical (dupla), parte superior fixa, calafetada	cm ² /lms	0.87	0.62	1.24
Porta para hall/vestíbulo	cm ² /un	10			Soleira	cm ² /mlf	0.21	0.139	0.212
Interruptores e tomadas elétricas:					Lareira:				
Sem juntas	cm ² /un	2.5	0.5	6.2	Com abafador aberto	cm ² /m ²	43	10	92
Com juntas	cm ² /un	0.15	0.08	3.5	Com abafador fechado	cm ² /m ²	350	145	380
					Com porta de vidro	cm ² /m ²	40	4	40
Fornalha:					Embutida (com porta), abafador fechado	cm ² /m ²	36	26	46
Selada ou sem combustão	cm ² /un	0	0	0	Embutida (com porta), abafador aberto	cm ² /m ²	65	40	90
Com elemento para retenção ou abafador	cm ² /un	30	20	30					
Com elemento para retenção e abafador	cm ² /un	24	18	30	Equipamento de aquecimento de água a gás:	cm ² /un	20	15	25
					Juntas para teto-parede	cm ² /mlf	1.5	0.16	2.5
Pavimentos sobre espaços não habitáveis:					Placa de fixação para pavimento-parede, não calafetada	cm ² /mlf	4	0.38	5.6
Geral	cm ² /m ²	2.2	0.4	4.9	Placa de fixação para pavimento-parede, calafetada	cm ² /mlf	0.8	0.075	1.2
Sem condutas no espaço	cm ² /m ²	1.98			Placa de fixação ao teto	cm ² /mlf	0.1	0.075	0.38
Com condutas no espaço	cm ² /m ²	2.25							

Legenda: Abreviações: **un**: unidade; **M.E.**: Melhor estimativa; **mlf**: metro linear de fenda; **lms**: metro linear de faixa.

Caso seja necessário é possível fazer a conversão das áreas de fuga de ar, utilizando determinada pressão de referência, para outras pressões através da seguinte fórmula:

$$A_{r,2} = A_{r,1} \left(\frac{C_{D,1}}{C_{D,2}} \right) \left(\frac{\Delta p_{r,2}}{\Delta p_{r,1}} \right)^{n-0.5} \quad (2.2)$$

Onde: $A_{r,1}$ = Área da fuga à pressão de referência, em cm²;

$A_{r,2}$ = Área da fuga à pressão de referência, em cm²;

$C_{D,1}$ = Coeficiente de escoamento utilizado para calcular $A_{r,1}$;

$C_{D,2}$ = Coeficiente de escoamento utilizado para calcular $A_{r,2}$;

n = Expoente de escoamento.

O expoente varia entre 0,5 e 1,0 correspondendo a escoamentos turbulentos (frinchas de pequenas dimensões) e escoamentos laminares (frinchas de grandes dimensões) respetivamente. Deverá ser calculado através da equação 2.1 mencionada no ponto 2.1.4. da presente dissertação.

A área de escoamento de ar a uma pressão de referência pode ser convertida para uma taxa de fluxo de ar através de outra pressão pela seguinte fórmula:

$$Q_{r,2} = \frac{c_{D,1} A_{r,1}}{10000} \sqrt{\frac{2}{p}} (\Delta p_{r,1})^{0.5-n} (\Delta p_{r,2})^n \quad (2.3)$$

Onde: $Q_{r,2}$ = Fluxo de escoamento a uma variação de pressão de referência $\Delta p_{r,2}$, m³/s.

O coeficiente de escoamento c pode ser convertido para uma área de escoamento de acordo com:

$$A_L = \frac{10000}{c_D} \sqrt{\frac{p}{2}} \Delta p_r^{(n-0.5)} \quad (2.4)$$

Finalmente, uma área de escoamento pode ser convertida através do coeficiente de escoamento c de acordo com:

$$c = \frac{c_D A_L}{10000} \sqrt{\frac{2}{p}} (\Delta p_r)^{0.5-n} \quad (2.5)$$

As equações 2.2 a 2.5 exigem a assunção de um valor de n , a menos que seja retirado de medições previamente realizadas. Os valores, resultado do ensaio de pressurização, estão de acordo com a equação 2.1, sendo que o valor do fator n situa-se geralmente entre 0,6 e 0,7.

No entanto o problema associado a infiltrações em habitações multifamiliares é bem mais complexo devido à parede divisória entre os diferentes apartamentos e também ao tamanho da envolvente do edifício (*Sherman and Chan, 2004*). Para além disso, há trajetos de fuga adicionais que devem ser considerados, por exemplo, unidades adjacentes, portas dos vãos de escadas, caixa de elevadores, etc. Também o escoamento entre as diferentes unidades de habitação varia amplamente, ou seja, esta tende a ser diminuta na construção recente podendo chegar aos 60 % em construção mais antiga (*Modera et al. 1991, Diamond et al. 1986*).

No entanto existem alguns estudos, realizados em edifícios multifamiliares, que tentaram dar resposta a estas questões.

Shaw, 1980 realizou ensaios em 5 edifícios, no Canadá, por forma a contabilizar as fugas através de janelas, paredes, portas de varanda entre outras articulações. A maioria dos valores apresenta alguma discrepância tanto de um prédio para o outro como dentro da mesma unidade. De todas as janelas testadas, apenas 1/3

destas cumprem as especificações *ASHRAE* (0,19 CFM/ft² a 50 Pa). Grande parte das portas de ligação às varandas, cerca de 2/3, cumprem também as especificações. Concluiu-se assim que as principais fontes de fuga de ar se verificam na ligação entre as paredes exteriores com o pavimento, janelas e peitoris.

Outro estudo, levado a cabo por *Konaven* e *Sateri* na Finlândia em 1997, em dois edifícios multifamiliares, provou mais uma vez que o principal trajeto de fuga seria a porta de ligação às varandas. Três de oito apartamentos, após uma reabilitação que não deu especial atenção à selagem da envolvente do edifício, tornaram-se menos estanques, apesar de todas as janelas e portas de apartamentos terem melhorado o seu comportamento.

Murakami e Yoshino, 1983, testaram a infiltração de dezasseis apartamentos em sete edifícios, situados no Japão. Os ensaios demonstraram que existe um vasto número de elementos responsáveis por fugas de ar, para além de janelas, portas, sistemas de ventilação, aberturas para instalações elétricas e tubagens. Num dos quartos testados, as fugas através do teto, e das ligações entre teto parede e pavimento parede, no seu conjunto, representaram cerca de 3/5 das fugas registadas. Para além destes elementos, verificou-se na maior parte das janelas instaladas, que estas possuíam um nível de estanquidade muito aquém do expectável.

Recentemente foram realizados na Finlândia ensaios exaustivos em vinte e uma moradias unifamiliares e dezasseis apartamentos de diferentes edifícios. Foi possível assim encontrar um termo de comparação entre edifícios unifamiliares e multifamiliares. Os ensaios foram realizados durante os invernos 2005 a 2007. A estanquidade de cada unidade foi medida utilizando o ensaio de pressurização realizado com porta ventiladora. Registou-se que os principais locais de vazamento estão localizados em volta e através das janelas e portas, nas ligações teto pavimento com a parede exterior, perfurações existentes em paredes com caixa-de-ar, através de pavimentos e paredes entre apartamentos, Figura 2.13.

Nas moradias o principal local onde foi registado maior número de fugas foi na junção entre o telhado e a parede exterior, enquanto que, nos apartamentos estas fugas têm lugar principalmente em torno das portas e janelas.

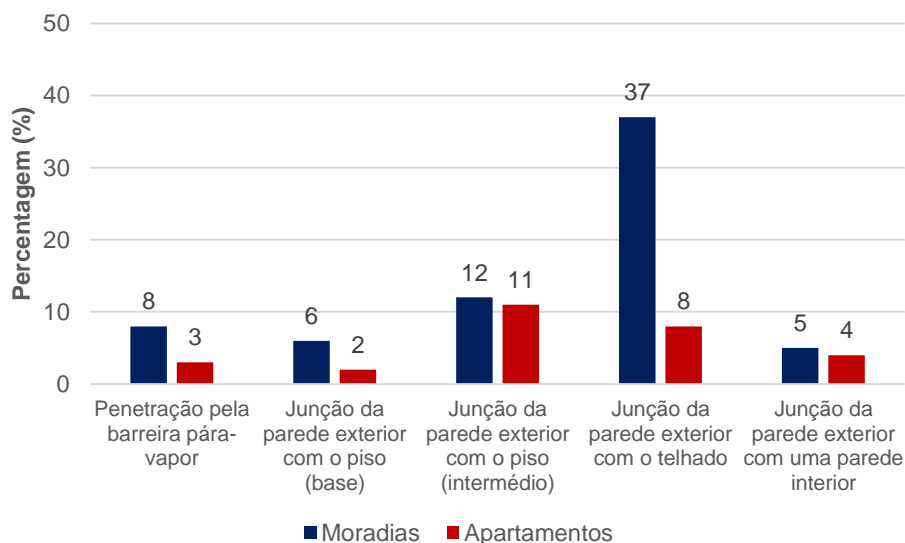


Figura 2.13 - Localização dos locais que promovem fugas de ar.

2.3. ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO

2.3.1. CONCEITOS GERAIS

Porta Ventiladora (Figura 2.14) é a designação atribuída ao dispositivo com capacidade para pressurizar ou despressurizar um edifício, medindo o fluxo de ar e pressão resultante aí existente, permitindo assim com facilidade determinar o grau de estanquidade da sua envolvente e quais os locais e as causas de possíveis fugas de ar. O nome surge do facto de existir um ventilador montado numa estrutura semelhante a uma porta, sendo o termo genérico para o definir “Ensaio de Pressurização”.

A base deste sistema está na possibilidade de obtenção de um registo do fluxo (caudal de ar) necessário para que se verifique, entre a ambiência interior e exterior, determinado diferencial de pressão (Δp).

Em suma a pressurização/ despressurização, de determinado edifício permite a formulação de análises das infiltrações de ar aí verificadas, com principal destaque para os seguintes pontos:

- Medição da permeabilidade ao ar;
- Verificação da sua validade relativa à regulamentação existente;
- Comparação entre edifícios ou parte destes em termos de eficiência;
- Identificação dos locais que permitem infiltração.
- Determinação da redução da infiltração de ar resultante após a implementação de medidas de ajuste aplicadas no edifício ou em parte deste.



Figura 2.14 - Sistema da porta ventiladora.

Este mecanismo foi utilizado pela primeira vez na Suécia em 1977 sendo para isso utilizada uma janela em vez de uma porta (Kronvall, 1980) com a finalidade de testar a estanquidade da envolvente do edifício (Blomsterberg, 1977). Em 1979, esta tecnologia foi utilizada por Caffey no estado do Texas e também por

Harrje, Blomsterberg e Persily na Universidade de Princeton, já utilizando o formato de porta, com a finalidade de encontrar e arranjar possíveis fugas de ar.

Durante este período, as potencialidades deste mecanismo começou a tornar-se evidente. A Porta Ventiladora ajudou *Harrje, Dutt e Beya* (1979) no sentido em que tornou possível a percepção de fugas, que anteriormente não eram detetadas, sendo estas responsáveis por uma percentagem bastante mais elevada de vazamento comparativamente aos dispositivos que antes se julgavam os principais responsáveis, como portas, janelas e tomadas elétricas.

O uso de Portas Ventiladoras como parte integrante do processo de climatização e remodelação tornou-se conhecido pelo termo *House Doctoring* através de *Harrje e Dutt* (1981) na costa leste e através de *Diamond et al.* (1982) na costa oeste. Estes avanços levaram *Harrje* (1981) à criação de auditorias e a *Sonderegger et al.* (1981) ao desenvolvimento de otimizações computadorizadas.

Embora este ensaio permita a medição da permeabilidade ao ar, o ensaio de pressurização e os dados retirados deste, não podem ser utilizados para determinação, em tempo real sob condições naturais, de caudais de ar ou para realização de estimativas do comportamento de sistemas de ventilação complexos. Na Figura 2.15 encontra-se representado um esquema de um ensaio para avaliação da estanquidade de uma habitação com equipamento de pressurização instalado e aberturas intencionais fechadas. Neste caso o edifício encontra-se em despressurização provocando infiltração de ar. A quantidade de caudal medida pela porta coincide com o caudal de infiltração de ar representado pelas setas a azul. No capítulo 3 da presente dissertação será desenvolvida a questão relativa ao procedimento de ensaio assim como uma abordagem aos diferentes elementos que tornam possível a realização do ensaio.

Embora existam métodos padronizados para este tipo de teste, existem ainda muitas discrepâncias nos indicadores utilizados para fins de cálculo ou conformidade.

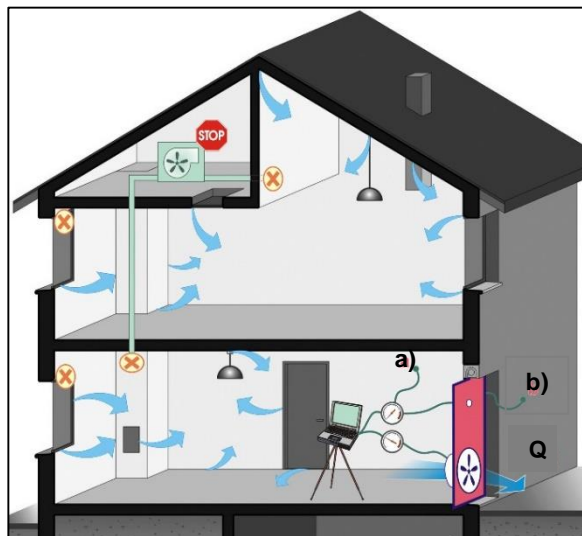


Figura 2.15 - Representação esquemática de um ensaio de estanquidade utilizando o sistema de porta ventiladora. Representação de um edifício em despressurização, caudal (Q) flui para fora da habitação. a) Pressão interior; b) Pressão exterior. (Adaptado de CETE de Lyon).

2.3.2. ABORDAGEM NORMATIVA

A EN13829 é a Norma Europeia para o ensaio com Porta Ventiladora. Esta é tomada como a norma padrão para a realização de medições de permeabilidade ao ar de edifícios ou parte destes recorrendo ao uso da pressurização e despressurização mecânica, fazendo o levantamento de quais os caudais resultantes de uma variação de pressão entre o exterior e o interior.

Com a constante preocupação na procura de aperfeiçoamento destes ensaios e na tentativa de os expandir a nível mundial surgiu a ISO 9972. No entanto é de notar que o conteúdo desta norma é em muito semelhante à já existente EN13829:2006, este facto é justificável pela importância dada à comparabilidade dos testes conduzidos nos diferentes países ao longo do tempo.

2.3.2.1. Condições Iniciais de Ensaio

De acordo com a ISO 9972:2012, um ensaio com porta ventiladora só poderá ser realizado se uma série de condições estiverem satisfeitas:

- A envolvente do edifício deverá estar completa (ou pelo menos a parte em que será realizado o teste);
- A velocidade do vento deverá ser menor ou igual a 6 m/s, ou menor ou igual a 3 utilizando a escala de Beaufort (ver Anexo 2);
- O produto da diferença de temperaturas (interior e exterior) e a altura do edifício terá que ser menor que 500, conforme a expressão:

$$500m \cdot ^\circ\text{C} > [T_i - T_e] \cdot h_{\text{fração}}(m) \quad (2.6)$$

- A pressão estática (fluxo zero) entre o interior e o exterior do edifício com a envolvente selada, mas sem equipamento de teste em execução, deve ser inferior a 5 Pascal (Pa) ao longo de, em média, 30 segundos;
- Estas variáveis devem ser verificadas depois do teste de modo a assegurar que as condições anteriormente descritas não sofreram alteração.

O que separa os diferentes métodos e protocolos de ensaio é a análise de resultados. O protocolo mais simples é aquele mais frequentemente utilizado, onde são realizadas medições com apenas uma pressão de referência. A pressão normalmente escolhida é convencionalmente 50 Pa, verificando-se assim que a maior parte dos estudos realizados são feitos utilizando esta pressão, é possível assim proceder a comparações entre os ensaios.

50 Pa é uma pressão suficientemente elevada para anular as pressões causadas pelo vento e efeito chaminé. Infelizmente, o fluxo registado a 50 Pa não é o adequado para entender o comportamento da envolvente do edifício em relação aos fluxos de ar sob pressões de condução naturais. A pressão média através da envolvente situa-se mais perto de 1 Pa do que de 50 Pa. Desta forma para realizar uma estimativa precisa é necessário determiná-lo a pressões normais.

O princípio métrico utilizado para quantificação da estanqueidade ao ar, quer seja encontrado por extrapolação, interpolação ou por medição direta, é o caudal de ar através da envolvente, sendo para isso

utilizadas pressões de referência. As pressões de referência mais utilizadas são 50 Pa e 4 Pa, mas também há diversos estudos que utilizam pressões de 1 Pa, 10 Pa, 25 Pa e 75 Pa. O fluxo de ar é normalmente registado tendo em conta a pressão de referência (e.g. Q_{50}).

A pressão 75 Pa foi, em tempos, sugerida como pressão de referência devido à sua utilidade na medição de vários componentes da envolvente, como por exemplo janelas (*Henry and Patenaude, 1998*) Na prática, esta pressão é considerada muito elevada pois pode provocar alteração na resposta dada pelos diversos elementos quando sujeitos a grandes pressões e também devido ao equipamento de pressurização não ter capacidade de alcançar a pressão pretendida. O fluxo de ar requerido para atingir esta pressão pode também ele representar um problema em climas considerados severos.

A pressão 50 Pa, pelo contrário, é a pressão mais comum para medir o fluxo de ar. Este tem sido o valor tradicional desde que o ensaio através da porta ventiladora se tornou popular. É baixo o suficiente para ser tangível pela maior parte dos equipamentos e suficientemente elevado para que as condições climáticas não provoquem influencia nos resultados. Esta é a pressão característica utilizada para medições em pontos singulares.

A pressão 25 Pa, é uma pressão de referência utilizada para contabilizar fugas registadas em condutas (*Cummings et al., 1996*) sendo que por vezes é utilizada como pressão de referência por esse mesmo motivo. Muitas das vezes quando o equipamento não é capaz de atingir 50 Pa esta é a solução adotada.

A pressão 10 Pa é utilizada tipicamente no Canadá como pressão de referência, para a área de infiltração equivalente (ELA).

A pressão 4 Pa é utilizada como pressão de referência nas normas ASHRAE e na ASTM E779 na definição de área de infiltração equivalente (ELA).

A pressão 1 Pa é a mais baixa das pressões de referência utilizadas na literatura disponível. A extrapolação dos dados resultantes da medição, normalmente registados a pressões muito mais elevadas, é bastante mais incerta do que para qualquer outro tipo.

O caudal registado e área de infiltração a determinada pressão de referência contêm a mesma informação, apenas em diferente forma. Formulações através do registo de determinado caudal são mais facilmente contabilizadas pois relacionam-se mais diretamente com o seu equipamento. Em relação ao equipamento utilizado para os testes está especificado que:

- O equipamento utilizado para a movimentação de ar inclui um qualquer dispositivo que seja capaz de induzir uma gama específica de diferenciais de pressão positiva e negativa através da envolvente do edifício ou parte deste. O sistema deve fornecer um fluxo de ar constante independentemente da pressão em utilização e do período necessário para obtenção das leituras;
- Qualquer dispositivo capaz de medir diferenças de pressão com uma precisão de ± 2 Pa numa gama entre 0 Pa a 100 Pa pode ser considerado;
- Sistemas de medição da taxa de fluxo de ar podem incluir qualquer dispositivo capaz de medir o caudal de ar escoado dentro de 7 % da leitura;
- Devem ser tomadas precauções caso o princípio subjacente à medição da taxa de fluxo de ar seja um orifício, ou seja, as leituras devem ser corrigidas de acordo com a densidade do ar;
- O dispositivo utilizado para medição da temperatura deve ter uma precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$.

2.3.2.2. Preparação do Ensaio

A norma EN 13829:2006 descreve dois métodos para realização do teste de pressurização designando-os por método A e método B (a nova versão da ISO 9972:2012 menciona três métodos, acrescentado o método C). O ponto-chave que estabelece as diferenças entre os métodos reside na seleção das aberturas existentes no edifício que poderão ser seladas. Desta forma, consoante o objetivo da realização do teste é tomada a opção de qual o método a utilizar.

Todas as aberturas intencionais na envolvente do edifício relacionadas com sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado devem ser tratadas de acordo com o método adotado. As três opções possíveis são fechar, selar e deixar aberto. Uma breve abordagem dos pontos principais que merecem especial atenção encontra-se discriminados no Quadro 2.2.

Método A, é aplicável para a medição da hermeticidade do edifício em uso, ou seja, o edifício encontra-se em condições normais de funcionamento. Tanto o sistema de aquecimento como o de arrefecimento representam as condições normais de funcionamento para a época do ano em que decorre o teste. O principal objetivo é então a contabilização da taxa de ar que influencia a infiltração ou exfiltração em condições consideradas reais. Este é o método indicado quando é pretendido fazer uma avaliação do ponto de vista energético. Para a realização deste método todas as aberturas, como portas, janelas e grelhas de ventilação auto reguláveis, do edifício devem encontrar-se fechadas.

Método B aplica-se na medição da estanqueidade da envolvente do edifício. Neste caso qualquer abertura intencional na envolvente do edifício deverá encontrar-se fechada ou selada, assim como todos os dispositivos de aquecimento/ arrefecimento e de ventilação devem ser desligados de modo a permitir uniformidade em todas as áreas ensaiadas de todos os elementos interiores, excetuando armários e outros elementos semelhantes, devem encontrar-se abertos.

Método C, tal como o método A, aplica-se ao edifício nas suas condições naturais. Dispositivos regulados automaticamente, montados no exterior, devem ser selados. Isto é válido para dispositivos de abastecimento e extração natural e sistemas de exaustão mecânica. Este método permite a adaptação das condições de ensaio consoante a sua finalidade.

Quadro 2.2 - Tratamento das aberturas intencionais em função do método utilizado (ISO 9972:2012).

Aberturas	Método A	Método B	Método C
Aberturas para ventilação natural	Fechado	Selado	Fechado, selado ou aberto conforme a especificação
Aberturas do edifício para ventilação mecânica ou ar condicionado	Selado	Selado	Fechado, selado ou aberto conforme a especificação
Aberturas para ventilação mecânica ou ar condicionado (uso intermitente)	Fechado	Selado	Fechado, selado ou aberto conforme a especificação

Janelas, portas, portinholas	Fechado	Fechado	Fechado, selado ou aberto conforme a especificação
Outras aberturas que não sejam para ventilação	Fechado	Selado	Fechado, selado ou aberto conforme a especificação

A norma recomenda a realização de dois conjuntos de medições, tanto para pressurização (P+) como para despressurização (P-), mas esta é apenas uma recomendação.

O desvio gerado entre os dois resultados pode ser bastante significativo (*Milovanovic et al.*) podendo a percentagem entre a taxa de infiltração de ar, em modo de despressurização (P-), e a média entre pressurização e despressurização atingir 10 %.

Para a mesma amostra de testes realizados em 20 edifícios diferentes (*Alfano, 2011*), o desvio entre P+ e P- é superior a 2 % para a maioria dos edifícios testados (2 % é o valor de erro médio). Estes desvios podem ser justificados devido à diferença física entre os dois conjuntos de medições, tais como a assimetria verificada em algumas saídas de ar tais como alguns exaustores de cozinha.

2.3.2.3. Processo de Ensaio

Existem alguns passos que devem ser tomados ao longo do ensaio para que este seja completado com sucesso.

Primeiramente deve ser efetuada uma verificação completa à envolvente do edifício, utilizando para isso a pressão mais elevada de forma a encontrar locais responsáveis por infiltrações elevadas e também para verificar falhas nas selagens efetuadas para efeito de ensaio. Se tais vazamentos forem detetados deverá ser tomada nota no respetivo relatório de ensaio. Tomando estas medidas preventivas qualquer selagem temporária (e.g. dispositivos de aquecimento, ventilação, ar-condicionado) que tenha sido esquecida ou vedada de forma incorreta deve ser prontamente corrigida.

Deve ser dada especial atenção à canalização e sistemas de tubagens, verificando se estes se encontram corretamente selados.

De forma a corrigir a medição da taxa de fluxo de ar para densidade deve ser registada a temperatura no interior e do exterior do edifício, durante e após o ensaio.

Registar a velocidade e intensidade do vento. A intensidade do vento pode ser determinada através de análise visual de alguns elementos, como árvores. Tal como o estipulado pela escala de Beaufort (Anexo 2) será suficiente.

Uma pressão com fluxo nulo deve ser imposta antes de começar o ensaio de forma a calibrar o mecanismo a ser utilizado para realização do teste. Esta pressão permite o ajustamento das diferenças de pressão, na envolvente do edifício, provocadas pelo efeito chaminé e do vento. É medido o diferencial de pressão entre interior e exterior através do dispositivo adotado devendo este ser coberto temporariamente.

Observar e registar a média de valores com diferencial de pressão que provocam fluxo nulo, ou seja, devem ser feitos registos para a média dos valores positivos ($\Delta P_{0,1+}$), a média dos valores negativos ($\Delta P_{0,1-}$) e a média de todos os valores registados ($\Delta P_{0,1}$) ao longo de, no mínimo, 30 segundos. No entanto se qualquer um destes valores exceder ± 5 Pa o teste deve ser declarado não válido.

No final do ensaio deve ser repetido o mesmo processo por forma a obter novos registos ($\Delta P_{0,2+}$, $\Delta P_{0,2-}$ e $\Delta P_{0,2}$). Novamente se qualquer um destes valores exceder o limite de 5 Pa o teste deve ser considerado não válido. Tal como indicado pela norma, se o utilizador levar a cabo um relatório de ensaio, mesmo que este não seja válido, devem ser registados os valores dos resultados de ensaio.

Após estas medições o orifício deve ser destapado e deve ser posto a funcionar o equipamento. O teste é realizado por meio de registos do caudal escoado e da diferença de pressão entre o interior e exterior ao longo de uma gama de diferenciais de pressão aplicada em incrementos que não ultrapassam cerca de 10 Pa. O mínimo diferencial de pressão deve ser aproximadamente de 10 Pa ou cinco vezes o diferencial de pressão de fluxo nulo (médias dos valores positivos e negativos), deve ser assumido o valor superior.

Para habitações unifamiliares e outros edifícios de pequena escala o diferencial de pressão deve ser pelo menos de 50 Pa e inferior a 100 Pa para uma melhor precisão dos resultados obtidos.

Em grandes edifícios, sempre que possível, o diferencial deve ser o mesmo que o recomendado para habitações unifamiliares. No entanto, devido às grandes dimensões de alguns edifícios e devido às limitações práticas inerentes aos equipamentos, o valor mínimo de 50 Pa pode ser impossível de alcançar.

Como já referido, a norma recomenda que sejam realizados dois conjuntos de medições (pressurização e despressurização). No entanto é permitido fazer apenas um conjunto de medições, quer para pressurização ou despressurização e ainda assim cumprir os requisitos normativos, ou seja, para cada teste pelo menos cinco medições devem ser realizadas entre o diferencial de pressão mínimo e máximo não esquecendo a limitação de 10 Pa.

2.3.2.4. Relatório de Ensaio

Deve ser realizado um registo que faça a compilação de todas as informações relativas ao ensaio executado, devendo conter também todas as observações e resultados finais.

É assim estipulado pela norma um conjunto de pontos que devem ser compilados num relatório, tendo em vista a reprodutibilidade de resultados. As informações requeridas pela norma são as seguintes:

- a) Todos os detalhes necessários na identificação do caso de estudo: Objetivo do teste (método A ou B); endereço e a data de construção do edifício.
- b) Referência à norma utilizada e a qualquer alternativa adotada;
- c) Objeto de ensaio:
 - Descrição de quais as partes do edifício submetidas a ensaio;
 - Área da envolvente, volume interno assim como outras dimensões que possam ser úteis.
 - Registo de cálculos do ensaio para que os resultados possam ser revistos e verificados;
 - Descrição do estado das aberturas na envolvente da habitação, fechada, selada, aberta, etc.;
 - Registo das aberturas fechadas temporariamente;

- Registo do sistema de ventilação, ar condicionado e tipo de aquecimento;

d) Equipamento e procedimento:

- Equipamento e técnica utilizada;
- Número de série para cada item calibrado do equipamento utilizado;
- Data de expiração de calibração para cada item calibrado do equipamento utilizado;

e) Dados do ensaio:

- Diferenciais de pressão estática ($\Delta P_{0,1+}$, $\Delta P_{0,1-}$, $\Delta P_{0,1}$, $\Delta P_{0,2+}$, $\Delta P_{0,2-}$, e $\Delta P_{0,2}$) tanto para ensaios de pressurização como de despressurização;
- Caudais correspondentes aos diferenciais de pressão obtidos;
- Temperatura exterior e interior (antes e após o ensaio);
- Velocidade do vento e pressão barométrica (antes e após o ensaio);
- Se conveniente, registar o diferencial de pressões no piso inferior e superior no maior caudal escoado obtido;
- Gráfico bi-logarítmico que estabelece a relação entre caudais e pressões;
- Coeficiente de escoamento de ar (C_{env}), coeficiente de infiltração de ar (C_L) e expoente de escoamento (n), para os ensaios de pressurização e despressurização;
- Indicador de variação de ar, RPH_{50} , a 50 Pa, para pressurização e/ou despressurização e valor médio;
- Quantidade derivada de acordo com a regulamentação nacional;
- Resultado do valor obtido para permeabilidade ao ar.

f) Data e hora do ensaio.

2.3.3. INCERTEZAS ASSOCIADAS AO ENSAIO COM PORTA VENTILADORA

O princípio do teste é relativamente simples e podem ser obtidos resultados que podem ser reprodutíveis em protocolos padrão (*Delmotte, 2011*), as fontes disponíveis mostram que também pode haver grandes diferenças nas grandezas consideradas dependendo do modo de realização do teste e do próprio operador. As razões para tais diferenças são:

- A preparação do edifício, ou seja, o modo como os vários elementos são selados ou fechados;
- Contabilização de volumes. Área da envolvente ou área de pavimento. A maior preocupação encontra-se na maneira correta de contabilização destes volumes, pois a sua definição permanece sujeita a interpretações;
- Em grandes estruturas ou em edifícios multifamiliares, muitas vezes é impraticável ou economicamente inviável realizar testes de estanqueidade em todo o edifício;
- A incerteza associada ao equipamento utilizado e a erros de *software*. Os requisitos associados à calibração dos dispositivos são ainda insuficientes para garantir pequenos desvios entre diferentes ensaios, especialmente quando são medidos fluxos de ar relativamente baixos;

- A pressão utilizada para contabilização do efeito do vento e chaminé, protocolos seguidos e método de análise. Embora as diretivas da norma ISO 9972:2012 definam que devem ser ignorados ensaios em locais com velocidade do vento elevada ($> 6 \text{ m/s}$).

É recomendável que sejam realizados maior número de medições utilizando diversos pontos de referência (pontos base), tendo em vista a redução de erros e incertezas associadas ao próprio mecanismo indutor das pressões no edifício em teste.

No Quadro 2.3 encontram-se alguns resultados de ensaios com incertezas aproximadas, que podem ter surgido devido à adoção de vários pontos base, tempo base e tempo médio de registo das pressões induzidas. Tal como é demonstrado, com o aumento do número de pontos de referência, do tempo base e do tempo médio de registo, as incertezas/ erros decrescem. Por exemplo, a repetição do ensaio utilizando a mesma porta ventiladora reduz o nível de incertezas em cerca de 5 % em cada caso. No entanto há que ter em conta que esta tabela exagera o nível de incerteza pois assume que diferentes dispositivos de ensaio e condições de teste iriam apresentar os mesmos tipos de erros.

Quadro 2.3 - Incertezas associadas aos resultados dos ensaios (Adaptado de Retrotec).

Erro de calibração	Erro do ventilador	Número de pontos de referência	Tempo de referência	Variação da pressão de referência	Tempos médios para pressão induzida	Incerteza associada
1 %	5 %	1	5 s	1,5 Pa	5 s	22 %
1 %	5 %	30	5 s	1,5 Pa	10 s	8,6 %
1 %	5 %	30	10 s	1,5 Pa	10 s	7,9 %
1 %	5 %	30	10 s	1,5 Pa	100 s	6,5 %
1 %	5 %	30	20 s	0,5 Pa	100 s	5,9 %

2.3.4. RESULTADOS

Cálculo dos volumes e áreas

Na norma ISO 9972:2012 encontra-se a especificação relativa ao volume interno, V . Que é o volume de ar que se encontra no interior do edifício ou parte deste. Este volume é calculado através da multiplicação da área útil (A_F), correspondente à área total de todos os elementos pertencentes ao volume interior, pelo pé direito e é calculada de acordo com os regulamentos nacionais. O volume das mobílias não é subtraído.

A área da envolvente, A_E , do prédio ou parte do edifício é a contabilização da área total de todos os pisos, paredes e tetos, que fazem fronteira com o volume interno sujeito ao teste. Isto inclui paredes e pisos abaixo do nível do solo. Não devem ser realizadas subtrações nas interseções entre paredes internas, pisos e tetos com paredes exteriores, pavimentos e tetos Figura 2.17.

O cálculo dos volumes e áreas não é clara no padrão atual para alguns pontos. *Ch. Delmotte et al.* fez a seguinte sugestão:

- Para o volume interno devem ser consideradas as dimensões globais internas, como para a área do envoltório Figura 2.17;
- Não deve haver nenhuma dedução para as divisórias internas e pisos (a diferença de superfície da divisão interna dentro de dois edifícios idênticos não pode ser considerada a única causa para a diferença nos resultados entre os indicadores R_{ph50} e w_{50} ;
- Não deve ser feita a contabilização das aberturas (e.g. portas ou janelas) na envoltório do edifício pois normalmente são pequenas áreas ou volumes que podem tornar o cálculo bastante demorado Figura 2.16;
- O volume pode ser diretamente calculado dividindo-se em sub-volumes mais simples, em vez de multiplicar a área útil pela altura geral do edifício conforme o exigido pela ISO 9972:2012.

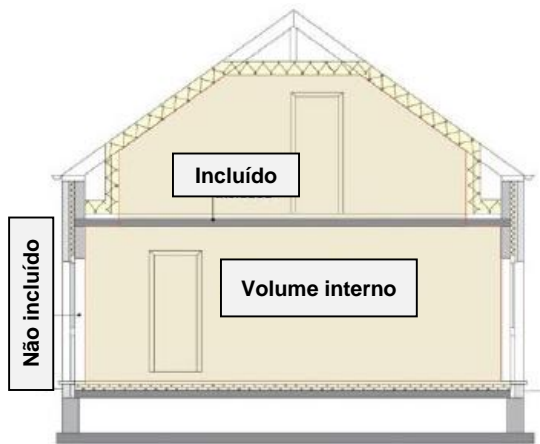


Figura 2.16 - Esquema da contabilização do volume interno

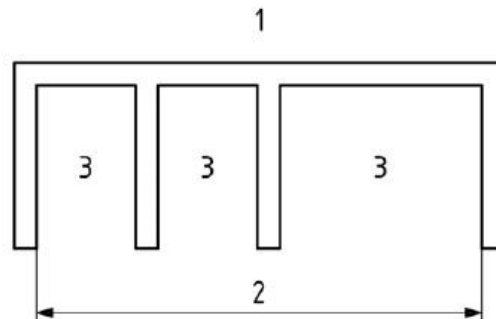


Figura 2.17 - Dimensões do edifício. 1) Exterior; 2) Dimensão global interior; 3) Divisões interiores

No entanto um método de cálculo mais preciso, provavelmente trará as seguintes desvantagens:

- Necessidade de mais detalhes e informações sobre a construção;
- Mais complicado;
- Mais demorado, mais caro;
- Mais riscos de erro, menos reprodutibilidade.

Método utilizado

O símbolo para os indicadores deve incluir o método utilizado (A ou B, de pressurização, despressurização, ou média), para evitar que os valores que não sejam passíveis de ser comparados possam estar representados pelo mesmo símbolo.

Por exemplo deve ser utilizada a nomenclatura Rph_{50} , A,P+ para indicar o valor de renovações por hora medidas a uma pressão de 50 Pa pelo método A em pressurização, em vez de apenas Rph_{50} .

Escolha dos indicadores a utilizar

O método padrão atual exige o cálculo e o registo do valor de Rph_{50} , enquanto outros parâmetros são usados por vezes a nível nacional, por exemplo w_{50} ($m^3/h.m^2$) sendo esta a razão entre o caudal escoado a 50 Pa e a área útil (área de pavimento) e, o indicador q_{50} ($m^3/h.m^2$) que estabelece a razão entre o caudal escoado, a 50 Pa e a área da envolvente. Para as medições de estanqueidade diária no contexto das regulamentações da EPB (*Energy Performance of Buildings*), o cálculo do valor de Rph_{50} , que requer o cálculo do volume interno, pode ser demorado e caro. Para grandes edifícios, a experiência acumulada em alguns países (*Blower Door GmbH, 2014*), mostra que o valor de q_{50} , poderia ser mais apropriado para avaliar grandes edifícios para os casos em que a razão entre o volume e a área de envolvente apresente valores elevados. Para comparação entre um pequeno e um grande edifício com os mesmos métodos de construção e detalhes, os valores da permeabilidade q_{50} seriam semelhantes enquanto que o valor de Rph_{50} seria consideravelmente menor para o grande edifício em comparação com o pequeno.

$$q_{50} = \frac{Q_{50}}{A_E} \quad (2.7)$$

$$w_{50} = \frac{Q_{50}}{A_F} \quad (2.8)$$

Onde: Q_{50} = Caudal escoado a 50 Pa, em m^3/h ;

A_E = Área da envolvente, em m^2 ;

A_F = Área útil em m^2 .

A lista destas grandezas poderia ser completada com a inclusão dos valores atualmente em uso em diferentes países (por exemplo, em anexo informativo). No entanto, seria importante, para os indicadores calculados por área de superfície, a definição de área de envolvente pois esta pode ser diferente de país para país incluindo ou não a superfície do piso.

2.4. RELAÇÃO RPH VS. RPH50

2.4.1. ENQUADRAMENTO

A medição das fugas de ar através da envolvente do edifício é geralmente realizada utilizando dois métodos padrão distintos:

- Ensaio de pressurização (ensaio com porta ventiladora) baseia-se na pressurização/ despressurização mecânica da totalidade ou parte de um edifício, avaliando o seu grau de estanqueidade, através do indicador Q_{env} (m³/h), que traduz o fluxo gerado pela envolvente do edifício, através da variação entre a pressão (Δp) interior e exterior.
- Método do gás traçador permite a avaliação da taxa de renovação de ar dos edifícios, utilizando para isso três medições diferentes variando a concentração de gás injetada.

Em geral, o método do gás traçador é mais preciso que o ensaio com porta ventiladora, no entanto, é menos reproduzível. Por esta razão, neste trabalho apenas será levado a cabo a análise experimental por meio do ensaio de pressurização/ despressurização.

Como referido anteriormente, neste ensaio a relação pressão/ caudal é dada pela expressão 2.1, referenciada em 2.1.4.

Utilizando esta equação é possível avaliar a taxa de infiltração de ar (Q_{50}), a partir do coeficiente de escoamento C_L e corrigindo o coeficiente de fluxo de ar C_{env} em condições padrão e à pressão de referência $\Delta p = 50 Pa$ (EN 13829:2006).

2.4.2. MÉTODO SIMPLIFICADO

A relação verificada entre o Rph_{50} e o Rph_{nat} , equação 2.9, foi investigada primeiramente no início dos anos 80 por *Kronvall*, 1978 e por *Persily*, 1983, em Nova Jérsea e na Suécia, que compararam os valores obtidos através da utilização do fator Rph_{50} , utilizando o ensaio através da porta ventiladora e a taxa de renovação de ar natural Rph_{nat} medida através do ensaio com gás traçador.

$$Rph = \frac{Rph_{50}}{20} \quad (2.9)$$

Devido à não consideração das características do meio onde o edifício está inserido (e.g. velocidade do vento, diferenças de temperatura interior/ exterior), nem as características de construção (e.g. altura, exposição ao vento, forma das fissuras). Esta é uma metodologia pouco precisa, pois o valor de Rph varia bastante consoante as características da envolvente. É considerada uma técnica bastante simplista, no entanto, têm sido desenvolvidos esforços para melhorar esta relação, através do ajuste de alguns fatores que afetam diretamente a quantidade de ar escoado num edifício específico em determinado local.

2.4.3 ABORDAGEM LAWRENCE BERKLEY LABORATORY

O LBL (Lawrence Berkeley Laboratory) desenvolveu um método, utilizado nos Estados Unidos da América, mais preciso para calcular as renovações horárias a partir de caudais de infiltração a 50 Pa que tem em consideração alguns fatores (Quadro 2.4), como por exemplo a altura da habitação, o vento e a proteção da fachada ao vento. Este método consiste em dividir o valor de RPH_{50} por um fator N , expressão 2.10 (Sherman, 1987).

$$Rph = \frac{Rph_{50}}{N} \quad (2.10)$$

Onde o fator de correlação N , é igual a:

$$N = C \times H \times S \times L \quad (2.11)$$

Onde: C = Fator climático, varia em função da variação local anual das temperaturas e vento, Figura 2.18;

H = Fator de correção representativo da altura do edifício;

S = Fator de correção representativo da proteção ao vento;

L = Fator correção representativo do tamanho das fendas.

Quadro 2.4 - Fatores de correção.

Número de pisos	1	1,5	2	3
Fator de correção, H	1	0,9	0,8	0,7

Proteção do vento	Elevada	Normal	Exposta
Fator de correção, S	1,2	1	0,9

Tamanho de fendas	Pequenas	Normais	Grandes
Fator de correção, L	1,4	1	0,7

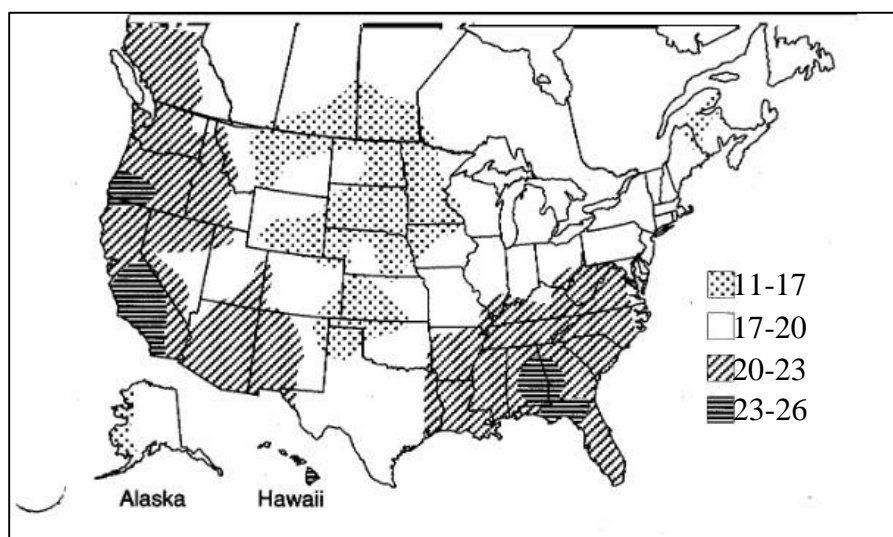


Figura 2.18 - Representação do fator climático C, nos EUA.

Tanto a relação $R_{ph50}/20$ e a relação proposta por Sherman apontam para uma extrapolação para um diferencial de pressão de 4 Pa. No entanto o método de Sherman é altamente dependente de parâmetros definidos pelo usuário, que podem afetar significativamente a estimativa da taxa média anual de infiltração em condições normais de operação.

Selecionando os fatores C , H , S e L , Quadro 2.4, fatores estes que requerem um elevado grau de sensibilidade e, portanto, sujeito a erros, percebemos que dependendo de quem realiza o ensaio os resultados poderão diferir. Facilmente se percebe a introdução de uma fonte de erro na estimativa da taxa de infiltração em condições normais e de funcionamento. No entanto o método R_{ph50} é popularmente utilizado na realização de auditorias de eficiência energética pois pode ser executado de forma rápida e fácil e é provavelmente suficiente para a maioria das situações.

2.4.4 VARIABILIDADE DO PARÂMETRO N

Em 1988, *Dubrul*, aplicou o estudo realizado por *Sherman* em alguns países da Europa, chegando à conclusão que o valor de N poderia variar entre 10 a 30, dependendo do tipo e da idade do edifício, da envolvente do edifício, das suas aberturas e também dos sistemas de ventilação adotados.

Esta enorme variabilidade do fator N nem sempre é considerado um problema, pois o ensaio através de porta ventiladora terá, em primeiro lugar, de ser considerado como um método de diagnóstico para:

- Estimar a permeabilidade ao ar de todo o edifício ou parte deste utilizando uma pressão especificada em projeto;
- Localizar as fontes das fugas de ar e investigar quais as suas principais causas;
- Estimar a redução do escoamento de ar após obras de reabilitação (por exemplo, substituição de janelas ou portas).

2.4.5. PERSPETIVA REH - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE VENTILAÇÃO

Os requisitos relativos ao desempenho térmico e energético, assim como o método que caracteriza o desempenho dos edifícios encontram-se estabelecidos no Decreto-lei 118/2013 de 20 de Agosto.

No atual enquadramento regulamentar, os edifícios de habitação estão abrangidos pelo novo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH, Portaria nº 349-B/2013). Este novo regulamento apresenta algumas alterações em relação ao anterior regulamento em vigor (RCCTE) no que diz respeito à ventilação.

O cálculo do valor de Rph pode ser feito de acordo com:

- A norma NP 1037 (partes 1 ou 2);
- A norma EN 15242;
- Outros dados como alternativa ao previsto na alínea anterior, desde que tecnicamente adequados e justificados num projeto de ventilação.

As taxas de ventilação (V) contempladas são diferentes para as estações de aquecimento e arrefecimento:

- Caudal mínimo para o cálculo térmico das necessidades nominais anuais de energia útil de aquecimento (Nic): $V \geq 0,4 \text{ Rph}$ (Portaria 349-B de 2013 (Rph,i));
- Caudal mínimo para o cálculo térmico das necessidades nominais anuais de energia útil de arrefecimento (Nvc): $V \geq 0,6 \text{ Rph}$ (Despacho 15793-K de 2013 (Rph,v));
- Caudal mínimo de ventilação para qualquer edifício (novo e grandes remodelações): $V \geq 0,4 \text{ Rph}$ (Portaria 349-B de 2013);
- Caudal de ventilação utilizado para o edifício de referência: $0,4 \text{ Rph} \leq V \leq 0,6 \text{ Rph}$ (Portaria 349-B de 2013 (Rph,ref)).

Para permitir avaliar o desempenho dos sistemas de ventilação no contexto da regulamentação do desempenho térmico e energético dos edifícios e da verificação do requisito mínimo de ventilação, foi desenvolvida uma ferramenta do tipo folha de cálculo disponibilizada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Esta ferramenta implementa o método de cálculo definido na Portaria n.º349-B/2013, no Despacho n.º15793-E/2013, no Despacho n.º15793-I/2013 e no Despacho n.º15793-K/2013.

Nos edifícios de habitação (novos e existentes), através de um conjunto de dados de entrada, obtém-se as taxas de renovação de ar da fração para a estação de aquecimento, para a de arrefecimento e para o edifício de referência. Esta aplicação funciona no ambiente *Microsoft Excel 2010*, *Microsoft Excel 2013*.

A folha de cálculo contempla os seguintes campos:

- Enquadramento do edifício;
- Classe de proteção do edifício;
- Permeabilidade ao ar da envolvente;
- Condutas e aberturas de admissão;
- Ventilação Natural;
- Ventilação mecânica;
- Ventilação híbrida;
- Resultados.

Na secção 1 da folha de cálculo é feito o enquadramento do edifício.

São pedidas informações relativas ao “Tipo de edifício”, sendo apresentadas as seguintes opções: “Habitação nova ou grande reabilitação”, “Habitação existente”, “PES novo ou grande reabilitação”, “PES existente”. “PES” é a sigla para Pequeno Edifício de Serviços. O campo “Rugosidade” pode ser preenchido com a opção “I” que contempla edifícios no interior de zona urbana, “II” para edifícios situados na periferia de uma zona urbana ou numa zona rural e a opção “III” para edifícios situados em zonas muito expostas (sem obstáculos que atenuem o vento). No campo “Altitude do local” deve ser colocada a altitude do local de implantação do edifício. É pedida também a informação relativa ao “Número de fachadas expostas ao exterior, estando disponíveis as opções “1” e “2 ou mais”. Neste ponto é considerado que quando determinada fachada representa mais de 70 % da área total de fachadas da fração e quando existem aberturas de ventilação apenas nessa fachada deve-se seleccionar a opção “1”. No campo “Existem edifícios/obstáculos à frente das fachadas” caso seja seleccionada a opção “Sim” aparecem automaticamente duas opções que pedem informação relativa à “Altura do edifício situado em frente” e a “Distância aos edifícios situados em frente”. É pedida também a altura do edifício em estudo, correspondente à maior distância vertical entre o ponto do teto da fração mais elevada do edifício e o nível do terreno, em m, no entanto, em caso de terreno ou teto com diferentes níveis, considera-se a maior distância na vertical. No campo “Altura da fração” deve ser considerada a maior distância vertical entre o teto da fração e o nível do terreno. Para além de todos os campos e opções mencionadas é requerida também a área útil o pé-direito e o número de pisos da fração em estudo. Na Figura 2.19 está representada a secção acima descrita com os dados relativos ao caso de estudo 2 da presente dissertação.

1. Enquadramento do edifício			
Tipo de edifício	Habitação_novo_ou_grande_reabilitação	Área útil (m2):	74,0
Local (município)	PORTO	Pd (m):	2,70
Região	A	N.º de pisos da fração	1
Rugosidade	I	Velocidade vento	Defeito REH
Altitude do local (m)	20	Vento (u10REH: 3,6) (m/s)	
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)	2 ou mais	Vol (m3):	200
Existem edifícios/obstáculos à frente das fachadas?	Não	Texterior (°C)	10,4
Altura do edifício (H_{edif}) em m	12	Zref (m)	94
Altura da fração (H_{+k}) em m	3	Aenv/Au:	18%
		Proteção do edifício:	Desprotegido
		Zona da fachada:	Inferior

Figura 2.19 - Secção 1, folha de cálculo REH.

Na secção 2 da folha de cálculo são pedidas informações para caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente. Caso não se tenha medido o valor de R_{ph50} tornam-se visíveis campos adicionais onde é requerida a “área total de vãos”, a “classe de permeabilidade ao ar das caixilharias” (a sua classe é obtida em ensaios normalizados de acordo com as normas de ensaio EN 1026 e de classificação EN 12207), no caso de janelas em que não exista, ou não seja possível, obter informação sobre a classe de permeabilidade ao ar, mas existam vedantes em todo o perímetro das juntas da janela, estas podem ser consideradas de classe 2. É também pedido o grau de permeabilidade das caixas de estore onde estão disponíveis as opções

“Baixa”, “Alta” e “Não tem”, na própria folha são descritas quais as condições que estas devem cumprir para cada um dos casos.

Na secção 3 é pedida informação relativa à existência de aberturas de admissão de ar na envolvente. Caso existam é necessário fornecer o valor do seu caudal nominal em m^3/h (aberturas autorreguláveis) ou a área total das aberturas em cm^2 (aberturas fixas ou reguladas manualmente).

Na Figura 2.20 estão representadas as secções acima descritas com os dados relativos ao caso de estudo 2.

2. Permeabilidade ao ar da envolvente				
Foi medido valor n50	Não			
Para cada Vão (janela/porta) ou grupo de vãos:				
Área dos vãos (m^2)	13,385	0	0	0
Classe de permeabilidade ao ar caix (janelas/portas)	3	4	4	4
Permeabilidade ao ar das caixas de estore	Não tem	Não tem	Não tem	Não tem
3. Aberturas de admissão de ar na envolvente				
Tem aberturas de admissão de ar na envolvente	Sim			
Tipo de abertura	Fixa ou regulável manualmente	Auto-regulável a 2 Pa	Auto-regulável a 10 Pa	Auto-regulável a 20 Pa
Área livre das aberturas fixas (cm^2) /	0	180	0	0
Caudal Nominal aberturas auto-reguláveis (m^3/h)				

Figura 2.20 - Secção 2 e 3, folha de cálculo REH.

As restantes secções dizem respeito à contabilização das condutas de ventilação natural, exaustão ou insuflação por meios mecânicos de funcionamento prolongado e ventilação por meios híbridos de baixa pressão. Estas secções não serão desenvolvidas na presente dissertação pois não são condicionantes para a avaliação das características da permeabilidade da envolvente.

2.5. REQUISITOS DE ESTANQUIDADE AO AR

Requisitos relativos à estanqueidade ao ar apresentada pela envolvente dos edifícios são expressos, normalmente, através de níveis máximos de fugas registadas através da envolvente do edifício, podendo estar relacionadas com o volume do edifício (R_{ph50}), com a área útil do edifício (w_{50}) e com a área da envolvente do edifício (q_{50}).

A nível mundial existem várias normas/ diretivas que apresentam os requisitos e preparação para os ensaios realizados recorrendo ao dispositivo da porta ventiladora (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 - Condições aceitáveis de preparação e requisitos de ensaio de vários protocolos e legislação aplicada para o ensaio utilizando o sistema de porta ventiladora.

Norma	ASTM	CGSB	EN 13829	ATTMA	USACE	Estado de Washington	LEED
Aplica-se a	Residências	Residências	Residências	Residências e grandes edifícios	Grandes edifícios	Grandes edifícios	Apartamentos
Origem	EUA	Canadá	Europa	Reino Unido	EUA	Estado de WA	América do Norte
Condições aceitáveis	41 a 95 °F Ou 5 a 35°C Vento <5mph	 Vento <20km/h	Vento <6m/s Altura * ΔT < 500 m°C	Vento <6m/s Altura * ΔT < 250 m°C	Pressões estáticas <10% da pressão mínima do ensaio ou <30% quando o ensaio é realizado em ambas as direções	Intervalo 95% de confiança	41 a 95 °F Ou 5 a 35°C Vento <5mph
Pontos base	Médias de 10 segundos, antes e após as medições de caudais	Antes de cada medição	Médias de 30 segundos, antes e após cada ensaio	Médias de 30 segundos, antes e após as medições de caudais	Médias de 20 segundos, 12 pontos antes e após medições de caudais	Médias de 10 segundos, antes e após as medições de caudais	Médias de 10 segundos, antes e após as medições de caudais
Intervalo de pressões induzidas	10 a 60 Pa	15 a 50 Pa	10 a 50 Pa	10 a 60 Pa	25 a 75 Pa	25 a 80 Pa	10 a 60 Pa
Número de pontos	5 a 10	1, 2 ou 7	5	7	12	12	5
Direção de teste preferido	Ambas	Despressurização	Ambas	Ambas	Ambas	Ambas	Ambas
Direção de teste aceitável	Indiferente mas usualmente despressurização	Despressurização	Usualmente despressurização	Usualmente pressurização	Indiferente a não ser que o edifício requeira mais de	Ambas	Indiferente

125,000 CFM							
ELA a 4 Pa		ELA a 10 Pa					
Resultados	RPH ₅₀	RPH ₅₀	RPH ₅₀	Q ₅₀	Q ₇₅	Q ₇₅	ELA a 4 Pa
	CFM ₅₀						
Resultados exigidos (valores máximos)	Nenhum	Nenhum	Nenhum	2 a 10 (m ³ /h)/m ² (Q ₅₀)	0,25 CFM ₇₅ /ft ² (Q ₇₅)	0,40 CFM ₇₅ /ft ² (Q ₇₅)	1,25 pol ² /ft ² ELA a 4 Pa

A nível Europeu vários países apresentam diversas exigências relativas à estanqueidade de diversos elementos dos edifícios. Comparando países vizinhos são detetadas muitas vezes semelhanças, no entanto, os regulamentos são normalmente atualizados em intervalos de tempo diferentes o que significa dificuldade no que toca ao encontro de termos comparativos entre estes, no entanto, a tendência é cada vez mais a apresentação de exigências mais ambiciosas, tendo em vista a poupança de energia em sistemas de aquecimento/ arrefecimento.

A implementação da diretiva *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) provocou, na maior parte dos países membros da União Europeia, requisitos mais severos no que toca ao desempenho energético das estruturas. De forma a conseguir alcançar estas novas exigências, não só foram utilizados componentes do edifício com melhores valores de U (coeficiente de transmissão térmica expresso em W/m².K), mas também foram adotados sistemas mais eficientes devido à necessidade de minimização de perdas por ventilação. Com a implementação da EPBD, ou até antes, alguns dos países incluíram requisitos mínimos relativos à estanqueidade em documentos regulamentares.

De acordo com uma investigação realizada em 2010 pela organização ASIEPI, onde foram realizados diversos inquéritos a treze dos países membros da União Europeia (BE, CZ, DK, ES, FI, FR, GR, IT, NL, NO, PL, PT), concluiu-se que apenas sete possuíam requisitos mínimos de níveis de estanqueidade nas suas normas relativas ao desempenho energético dos edifícios.

No contexto da diretiva EPB, para quantificação da estanqueidade ao ar utilizando uma porta ventiladora, foram desenvolvidas especificações adicionais à norma EN13829, pretendendo-se esclarecer os métodos descritos. Estas especificações e justificações encontram-se sumarizadas na Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Especificações adicionais à norma EN 13829.

País	Método	Aberturas	Aplicação	Pressão [Pa]	P+ / P-
Bélgica	A	Fechar: Todas as aberturas Selar: condutas de ventilação mecânica	Edifício ou apartamentos (individualmente)	50	P+ e P-
Dinamarca	-	-	Apenas apartamentos (individualmente)	-	P+ e P-
França	Adaptado	Método A com determinadas alterações: -Aberturas de ventilação (natural ou mecânica), contabilizadas nos cálculos EPB: fechadas ou seladas se não houver dispositivo para fechar -Sistemas de aquecimento ou arrefecimento: deixar aberto, fechado ou selado, dependendo do definido nos cálculos EPB	Estão definidas regras de amostragem	-	P+ e/ ou P-
Alemanha	A/ B	Método A com uma alteração: Aberturas para abastecimento de ar de um sistema de exaustão devem ser seladas. Método B com duas alterações: exaustores e aberturas não planeadas (caixas de correio) não devem ser seladas	Regras de amostragem definidas (FLIB)	-	P+ e/ ou P-
Holanda	-	Selar condutas de ventilação, abastecimento e exaustão de aberturas de fornecimento de gás. Fechar (se possível) aberturas de ventilação.	Edifício ou partes deste individualmente	85	P+ e/ ou P-
Noruega	B	Fechar: Todas as aberturas que podem ser fechadas normalmente.	Edifício ou apartamentos (individualmente)	-	P+ e P-
Polónia	B			100	P+ e P-
Reino Unido	B	Fechar: Sistemas de ventilação passiva. Selar: Aberturas permanentes para ventilação natural, aberturas de ventilação mecânica, portas para locais não abrangidos pelo ensaio.	Edifício ou apartamentos (individualmente)	50	P+ e/ ou P-

Legenda: **P+**: Pressurização; **P-**: Despressurização

Nesta área, nos últimos anos, têm sido feitos grandes desenvolvimentos. Sendo que em 2014 praticamente todos os países da União Europeia possuíam algum tipo de diretiva relativa a quais os níveis aceitáveis de estanquidade a apresentar pelas habitações. No Quadro 2.7 estão descritos limites de estanquidade presentes na legislação, atualmente em vigor, para alguns países.

Quadro 2.7 - Requisitos dos valores de R_{ph50} para diversos países. (Adaptado de Retrotec).

Norma	País	Condicionantes	Requisitos Rph ₅₀ [h ⁻¹]	
Passivhaus	-		0,6	
	Áustria	Ventilação natural	3,0	
		Ventilação mecânica	1,5	
	Bulgária	Apartamentos	Estanquidade alta	<2,0
			Estanquidade média	2,0 – 5,0
			Estanquidade baixa	>5,0
		Habitações unifamiliares	Estanquidade alta	<4,0
			Estanquidade média	4,0 – 10,0
			Estanquidade baixa	>10,0
TNI 730330	República Checa	Ventilação natural	4,5	
		Ventilação mecânica	1,5	
		Mecânica com recuperador de calor	1,0	
	Dinamarca	Residências	6,1	
	Estónia	Edifícios pequenos, novos	6,0 (m³/h)/m²	
		Edifícios pequenos, existentes	9,0 (m³/h)/m²	
	Finlândia	Certificado de performance energética (EPC)	4,0	
		Novos apartamentos	0,5	
	Alemanha	Com sistema de ventilação	1,5	
		Sem sistema de ventilação	3,0	
	Lituânia	Ventilação natural	3,0	
		Ventilação mecânica	1,5	
	França	Casas unifamiliares	4,5	

		Outros edifícios residenciais	6,8	
	Letónia	Habitações	3,0	
	Holanda	Com sistema de ventilação	2,0 – 3,0	
		Sem sistema de ventilação	4,0 – 6,0	
	Noruega		3.0	
	Eslovénia	Ventilação natural	3,0	
		Ventilação mecânica	2,0	
	Eslováquia	Casas unifamiliares com janelas de alta qualidade	4,0	
		Todos os outros edifícios	2,0	
TS 825	Turquia	Apartamentos (multifamiliares)	Alto	<2,0
			Médio	2,0 – 5,0
			Baixo	>5,0
		Habitações unifamiliares	Alto	<4,0
			Médio	4,0 – 10,0
			Baixo	>10,0
ATTMA TSL1	Reino Unido	Boa prática	Ventilação natural	5,5
			Ventilação mecânica	1,1
		Prática normal	Ventilação natural	7,7
			Ventilação mecânica	5,5

2.5.1. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO VS. PERMEABILIDADE AO AR

A infiltração do ar pode ter um efeito prejudicial sobre a eficiência dos sistemas de ventilação e, consequentemente na qualidade do ar interior, no conforto dos ocupantes e eficiência energética.

Edifícios extremamente permeáveis vão proporcionar elevadas taxas de infiltração, implicando a perda de energia devido à excessiva ventilação. Em edifícios com envolventes extremamente permeáveis e em que é utilizada extração mecânica, a taxa de infiltração será bastante elevada podendo ser equiparada aos resultados apresentados por edifícios onde é usada ventilação natural.

Por outro lado, edifícios com extração mecânica que apresentem níveis de estanquidade elevados podem levar a que sejam desenvolvidas elevadas pressões de sucção, o que trará como consequência um incremento no gasto de energia provocado pelo sistema de extração, refluxo devido a aparelhos de combustão e ventilação insuficiente. Este conjunto de situações poderá representar uma diminuição da qualidade do ar interior.

Será então importante responder a questões como: “Quão estanque é demasiado estanque?” Alguns estudos têm sido apresentados onde se tenta responder à questão que relaciona o sistema de ventilação em utilização com o nível de estanquidade do edifício. É assim importante perceber que o nível de estanquidade apresentado pela envolvente do edifício terá uma importante influência nas taxas de ventilação alcançadas (quanto maior for o grau de estanquidade, menor será a taxa de ventilação).

Na Figura 2.21 está ilustrada a sugestão realizada por Concannon (2002) que estabelece a relação entre valores de estanquidade ao ar (através do indicador R_{ph50}) para os vários sistemas de ventilação.

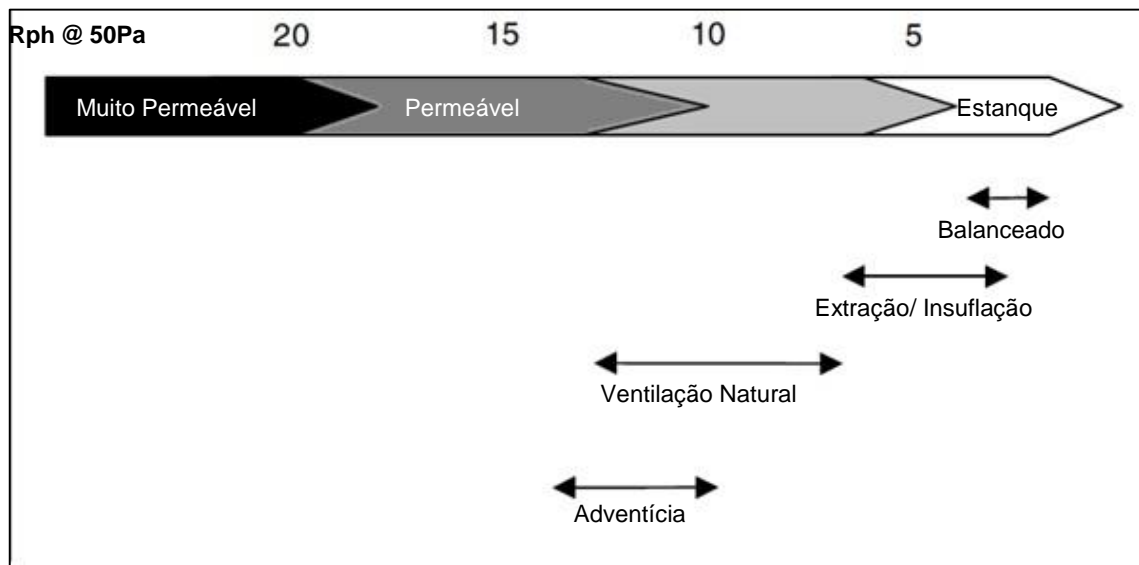


Figura 2.21 - Sugestão de relação entre os níveis de estanquidade e os valores de R_{ph50} (Adaptado de Concannon, 2002).

Outros autores também desenvolveram esta relação, no entanto as aproximações são feitas desenvolvendo a relação entre sistemas de ventilação e o indicador que expressa a permeabilidade da habitação, desta forma os valores apresentados serão muito menores pois é feita uma avaliação pelo método B (tema desenvolvido no 2.3.2.2 da presente dissertação) sendo feita uma avaliação da estanquidade da envolvente do edifício em vez de uma análise à permeabilidade apresentada em condições normais de funcionamento.

Alguns métodos, para obtenção de ventilação suficiente em relação ao sistema em utilização, encontram-se descritos no documento *The Building Regulations*, (ODPM, 2006), fazendo referência aos níveis de estanquidade sugeridos.

A estratégia de ventilação defendida por esta entidade encontra-se no esquema representado pela Figura 2.22. Aqui tem-se acesso aos valores de R_{ph} esperado quando induzida uma pressão de 50 Pa, ou seja, em sistemas balanceados são esperados R_{ph50} de valor menor ou igual a 1 h^{-1} , para sistemas com extração mecânica os valores situam-se entre os 1 e as 3 h^{-1} e para edifícios com sistemas de ventilação natural com sistemas de extração mecânica é provável que o valor de R_{ph50} se encontre acima das 3 h^{-1} .

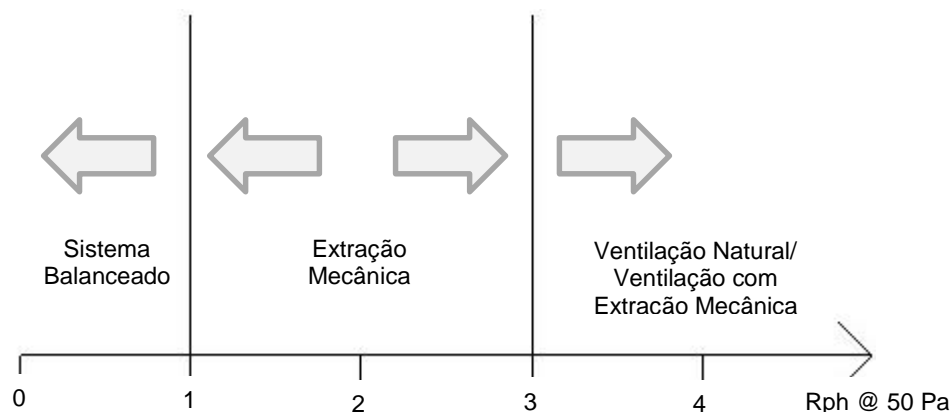


Figura 2.22 - Valores típicos de estanquidade sugeridos para diferentes tipos de ventilação. Adaptado de *Building Regulations* (ODPM, 2006).

A diretiva DIN 4108-7:2011, onde podem ser consultados valores recomendados de acordo com o sistema de ventilação em utilização, tipo de selagem do sistema interligando-os com o estado das aberturas/ grelhas de exaustão, apresenta os valores de R_{ph50} recomendados para a preparação de um edifício. Os valores apresentados no Quadro 2.8 estão direcionados para uma construção de elevado desempenho energético.

Quadro 2.8 - Valores máximos recomendados para medição da estanquidade a uma pressão induzida de 50 Pa. Adaptado de Erhorn-Kluttig and Erhorn (2012).

Sistema de Ventilação		Abertura externa passagem de ar	Preparação da abertura exterior e grelhas de extração	Valor máximo R_{ph50} [h^{-1}]
Ventilação Natural	Janelas		Não aplicável	3
	Ventilação cruzada através de abertura para o exterior	Impossível fechar	Estado Normal	3
		Manualmente Regulável	Abertura: Fechada	3
		Autorregulável	Abertura: Selada	1,5
	Ventilação Shaft	Não é possível fechar ou não possui abertura de passagem de ar	Abertura: Estado Normal Grelhas: Seladas	1,5
		Manualmente Regulável	Abertura: Fechadas Grelhas: Seladas	1,5
		Autorregulável	Abertura: Seladas Grelhas: Seladas	1,5
Ventilação Mecânica	Sistema de extração	Manualmente Regulável	Abertura: Selada	1

Sistema de extração e admissão	Autorregulável	Abertura: Selada	1
	-	Selagem da abertura de extração e admissão de ar	1

Numa abordagem diferente é estabelecida a relação entre o indicador de permeabilidade, q_{50} , o tipo de utilização de determinado edifício, onde são apresentados, não só os valores ótimos deste indicador, mas também valores considerados como resultados razoáveis para a definição de estanquidade de determinado edifício. Estes valores encontram-se no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 - Valores do indicador de permeabilidade q_{50} por tipo de utilização.

Tipo de Utilização		Valores indicador permeabilidade ao ar q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$]	
		Boa Prática/ Valores Ideais	Valores Normais
Escritórios	Ventilação natural	3	7
	Ventilação Mista	2,5	5
Utilização sistema refrigeração		2	5
Fábricas/ Armazéns		2	6
Supermercados		1	5
Escolas		3	9
Hospitais		5	9
Museus/ arquivos		1	1,5
Câmaras frigoríficas		0,2	0,35
Habitções	Ventilação natural	3	9
	Ventilação mecânica	3	5

2.6. AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES

A contabilização de infiltrações através de fissuras e juntas é uma tarefa complexa. É difícil identificar e caracterizar todas as aberturas existentes num edifício. A fim de ultrapassar esta dificuldade, os vários componentes de construção (e.g., janelas ou portas) são frequentemente testadas *in situ* ou em laboratório.

Em Portugal é escassa a quantidade de literatura disponível onde é estudada a permeabilidade ao ar de janelas, portas e entradas autorreguláveis (Pinto, 2007). Os coeficientes de permeabilidade do ar de diferentes componentes e elementos de construção (e.g. janelas, portas, paredes, pisos, tetos, juntas entre elementos de chaminés) podem ser consultados em literatura especializada e em normas internacionais ou regulamentos vigentes (AIVC Guide, 2002, and EN 12207, 1999)

Num estudo realizado em Portugal por (M. Pinto *et al.*, 2011) foi avaliada a permeabilidade ao ar de alguns apartamentos e dos seus elementos construtivos.

Os ensaios decorreram num edifício multifamiliar no distrito do Porto. Os testes foram realizados em cinco fogos. O volume dos apartamentos aproxima-se dos 160 m³.

O objetivo dos ensaios realizados foi a caracterização dos dispositivos de ventilação instalados e dos elementos construtivos.

A metodologia adotada para a obtenção da permeabilidade dos componentes recorre ao método indireto consistindo basicamente na obtenção do diferencial do caudal registado entre duas situações distintas. No caso de determinação da permeabilidade de uma janela, esta será obtida pelo diferencial obtido entre a situação inicial, em que o compartimento é pressurizado e um segundo ensaio em que as juntas da janela em questão são seladas. De acordo com a norma 13829:2000 foi adotada a metodologia correspondente ao método B. Todos os componentes dos sistemas de ventilação foram selados recorrendo a fita adesiva.

Os resultados obtidos estão de acordo com a norma ASTM E779:2003, que indica condições *standard* da realização de ensaio de 293 K e 101,3 kPa, desta forma os resultados apenas dependem de dados facilmente obtidos (massa volúmica, altura do local e temperatura).

Os ensaios realizados tiveram como objetivo avaliar os seguintes componentes:

- Desempenho das grelhas de admissão de ar;
- Desempenho das grelhas de passagem;
- Desempenho das janelas;
- Desempenho das caixas de estore;
- Desempenho das portas.

Para cada um dos elementos estudados foi obtida a equação que estabelece a relação entre a variação de caudal e a pressão induzida utilizando os indicadores resultantes de ensaio (coeficiente de escoamento, C e expoente de escoamento, n).

Os resultados obtidos para os vários componentes da envolvente encontram-se sintetizados nos Quadro 2.10 a Quadro 2.14.

Quadro 2.10 - Permeabilidade das grelhas autorreguláveis (Adaptado de *M. Pinto*, 2011).

Elemento construtivo	Apartamento	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m³/h]	Caudal 10 Pa [m³/h]
Grelhas autorreguláveis	4	Pressão	$q = 34,818\Delta p^{0,304}$	70,2
	4	Depressão	$q = 38,236\Delta p^{0,404}$	96,9
	5	Pressão	$q = 32,382\Delta p^{0,346}$	71,8
	5	Depressão	$q = 27,925\Delta p^{0,475}$	83,4

Quadro 2.11 - Permeabilidade das caixas de estore (Adaptado de *M. Pinto*, 2011).

Elemento construtivo	Apartamento	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m³/h]	Caudal 10 Pa [m³/h]
Caixas de estores	1	Pressão	$q = 107,44\Delta p^{0,369}$	251,6
	1	Depressão	$q = 81,117\Delta p^{0,513}$	264,1
	3	Pressão	$q = 49,219\Delta p^{0,576}$	185,2
	3	Depressão	$q = 99,602\Delta p^{0,446}$	278,0

Quadro 2.12 - Permeabilidade das janelas (Adaptado de *M. Pinto*, 2011).

Elemento construtivo	Apartamento	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m³/h]	Caudal 10 Pa [m³/h]
Janelas	1	Pressão	$q = 107,44\Delta p^{0,369}$	24,3
	1	Depressão	$q = 81,117\Delta p^{0,513}$	32,6
	3	Pressão	$q = 49,219\Delta p^{0,576}$	23,5
	3	Depressão	$q = 99,602\Delta p^{0,446}$	11,0
	4	Pressão	$q = 107,44\Delta p^{0,369}$	19,6
	4	Depressão	$q = 81,117\Delta p^{0,513}$	11,9
	5	Pressão	$q = 49,219\Delta p^{0,576}$	9,3
	5	Depressão	$q = 99,602\Delta p^{0,446}$	6,5

Quadro 2.13 - Permeabilidade das grelhas de passagem das portas da cozinha e instalações sanitárias (Adaptado de *M. Pinto*, 2011).

Elemento construtivo	Apartamento	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m³/h]	Caudal 10 Pa [m³/h]
Grelha de passagem das portas da cozinha e instalações sanitárias	1	Pressão	$q = 72,261\Delta p^{0,421}$	190,5
	1	Depressão	$q = 58,787\Delta p^{0,495}$	183,7
	3	Pressão	$q = 85,142\Delta p^{0,403}$	215,2
	3	Depressão	$q = 82,626\Delta p^{0,425}$	220,0

Quadro 2.14 - Permeabilidade das portas interiores aos apartamentos (Adaptado de *M. Pinto*, 2011).

Elemento construtivo	Apartamento	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m³/h]	Caudal 10 Pa [m³/h]
Portas interiores	4	Pressão	$q = 21,856\Delta p^{0,493}$	37,6
	4	Depressão	$q = 26,067\Delta p^{0,394}$	40,2
	5	Pressão	$q = 9,592\Delta p^{0,739}$	21,6
	7	Depressão	$q = 13,057\Delta p^{0,602}$	25,3

Dos ensaios realizados foram retiradas as seguintes conclusões:

- Grelhas autorreguláveis: não se consegue inferir se as grelhas são mais permeáveis em pressão ou depressão.
- Janelas: Em face da discrepância de resultados, principalmente para pressões elevadas, pode-se concluir que não é recomendável a extrapolação de ensaios para janelas de dimensões superiores.
- Portas: a permeabilidade não varia significativamente em função do sentido do fluxo (seriam de esperar maiores caudais no sentido da abertura das portas - pressão). Este resultado pode ser explicado pela reduzida permeabilidade da porta, o que leva a que o fluxo se dê essencialmente pela folga inferior.
- Caixas de estore: Os dados obtidos com a caixa de estores vêm confirmar que este é o componente com maior contribuição percentual para a permeabilidade global dos apartamentos, realçando a necessidade premente, de incrementar o respetivo desempenho.

3

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

3.1. SISTEMA PORTA VENTILADORA

Neste capítulo descrevem-se todos os procedimentos e considerações necessárias para realização do ensaio com o dispositivo da porta ventiladora.

O equipamento utilizado foi o *Retrotec 1000*, disponibilizado pelo Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC - FEUP). As suas características em termos de desempenho e caudais obtidos encontram-se apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Desempenho da gama de anéis disponíveis para o modelo *Retrotec 1000*.

Modelo Ventilador	Voltagem	Hz	C1	C2	C3	C4	C6	C8	B	A	Aberto
			Caudal máximo com pressão a 50 Pa por gama de anel [m³/h]								
EU1000	240	50	374	612	815	1053	1682	2209	4077	6116	8665
			Caudal mínimo com pressão a 50 Pa por gama de anel [m³/h]								
			85	167	247	320	500	683	1151	3342	6259
Incerteza			3 %								

O ventilador ligado ao sistema da porta ventiladora está especialmente dimensionado e calibrado para os ensaios de pressurização e despressurização. Tal como já foi referido no segundo capítulo da presente tese, este mecanismo funciona através da criação de um diferencial de pressão entre o interior e o exterior de determinado espaço. Este diferencial força o ar a escoar através de todas as aberturas da envolvente exterior.

A quantidade de fluxo necessária para manter um diferencial de pressão constante é igual à quantidade de ar que é escoado do compartimento.

Um sistema típico de uma porta ventiladora é constituído por seis partes principais:

- Um ventilador calibrado, capaz de criar um fluxo de ar mensurável.
- Anéis, para aplicação no ventilador, de restrição de caudal;
- Um painel em tecido estanque, que veda temporariamente uma porta comum, com uma abertura para montar o ventilador;
- Uma caixilharia, em metal, que garante a estabilidade do equipamento e selagem da abertura onde o mecanismo vai ser instalado;
- Um medidor de pressão diferencial de dois canais;
- Um regulador de velocidade do ventilador com a finalidade de alterar o fluxo de ar através do ventilador, ou *software* adequado instalado em computador.

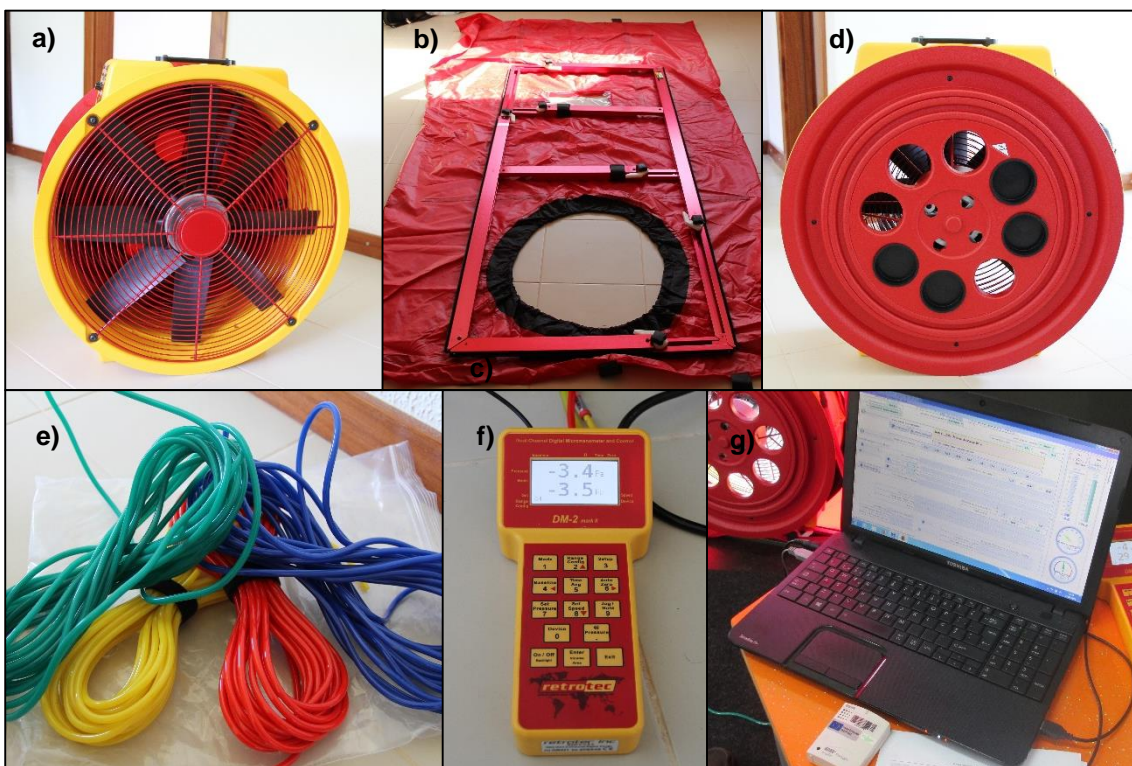


Figura 3.1 - Constituintes principais de um sistema de porta ventiladora. a) Ventilador; b) tecido estanque; c) caixilharia de alumínio; d) ventilador com anel colocado; e) tubos com sonda de pressão estática; f) manómetro; g) sistema com *software*.

Quando o ventilador é ligado, provoca a movimentação de ar através da sua caixa. A lâmina giratória, situada no seu interior, começa a mover-se criando uma pressão de sucção entre esta e a abertura. Os anéis são normalmente instalados no lado em que entra o fluxo por forma a controlar a quantidade de ar que passa através do ventilador, sendo assim possível controlar a pressão.

Através da medição da pressão do ventilador e o conhecimento do tamanho do orifício, pode ser calculado o volume de ar que se move através do ventilador.

Quando o fluxo de ar é reduzido através do ventilador, a pressão exercida torna-se insuficiente para ser realizada uma medição com precisão. Para atingir um nível com maior precisão será necessário aumentar a pressão gerada. Para elevar a pressão exercida, não podendo ser alterado o volume de ar movimentado, é colocada uma restrição na frente do ventilador. A restrição é realizada pela mudança da gama de anel utilizada.

3.2. INSTRUÇÕES BASE

3.2.1. PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Relativamente à preparação do espaço, onde vai ser realizado o ensaio, devem ser tomadas as seguintes medidas:

- Devem ser registados todos os valores necessários relativos a volumes e áreas da fração;
- Todas as portas internas da fração em estudo devem estar abertas;
- Todas as ligações com o exterior, ou fora da fração sujeita a ensaio devem ser fechadas (e.g. portas, janelas, claraboias exteriores.);
- Caso a fração possua lareira esta deve ser selada;
- Selar todos os dispositivos com sifão, caso estes não possuam água (e.g. lavatórios, bidés, bacias de retrete, etc.);
- Selar todas as aberturas existentes para ventilação;
- Os sistemas de climatização devem estar desligados;
- Todos os elementos que promovam a circulação de ar devem estar desligados e selados;
- Desligar sistema AQS;
- Selecionar a porta exterior mais adequada para instalação do sistema. Se possível evitar portas que possuam paredes, escadas, ou outras obstruções próximas. Isto pode levar a uma restrição do fluxo o que pode gerar resultados pouco precisos;
- Mover todos os elementos soltos na área de ação do ventilador.

As variáveis seguintes devem ser verificadas antes e depois do teste de modo a assegurar a viabilidade do ensaio:

- A velocidade do vento deverá ser menor ou igual a 6 m/s, ou menor ou igual a 3 utilizando a escala de Beaufort (ver Anexo 2);
- O produto da diferença de temperaturas e a altura do edifício terá de ser menor que 500 m.°C, conforme a expressão:

$$500 \text{ m. } ^\circ\text{C} > [T_i - T_e] \cdot h_{\text{fração}}(m) \quad (3.1)$$

- A pressão estática (fluxo zero) entre o interior e o exterior do edifício com a envolvente selada, mas sem equipamento de teste em execução, deve ser inferior a 5 Pascal (Pa) ao longo de, em média, 30 segundos;

3.2.2. MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

Relativamente à montagem do equipamento deve ser implementados um conjunto de procedimentos. Em primeiro lugar a caixilharia deve ser ajustada consoante a largura e a altura da porta onde esta será montada, (Figura 3.2). Seguidamente estende-se o quadro até cada um dos lados se encontrar em contato com a moldura da porta. Neste momento podem ser inseridas as barras transversais nas respetivas ranhuras.



Figura 3.2 - Ajuste da caixilharia à ombreira da porta selecionada para colocação do sistema.

Após o ajuste, a caixilharia deve ser removida para colocação do tecido estanque, tal como representado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Colocação do tecido estanque na caixilharia.

De seguida, coloca-se a estrutura no vão selecionado e ajustar mais uma vez. A Figura 3.4 exemplifica a colocação de fita adesiva entre a ombreira e a caixilharia do sistema da porta ventiladora. Dependendo da configuração desta estrutura por vezes é necessária esta medida de modo a garantir a estanquidade desejada.



Figura 3.4 - Colocação de fita adesiva na estrutura.

Segue-se a colocação do ventilador na abertura própria para o efeito, com a orientação desejada consoante o ensaio a realizar (pressurização ou despressurização). Este é suportado por uma das barras transversais da caixilharia através de uma fita em velcro, Figura 3.5.

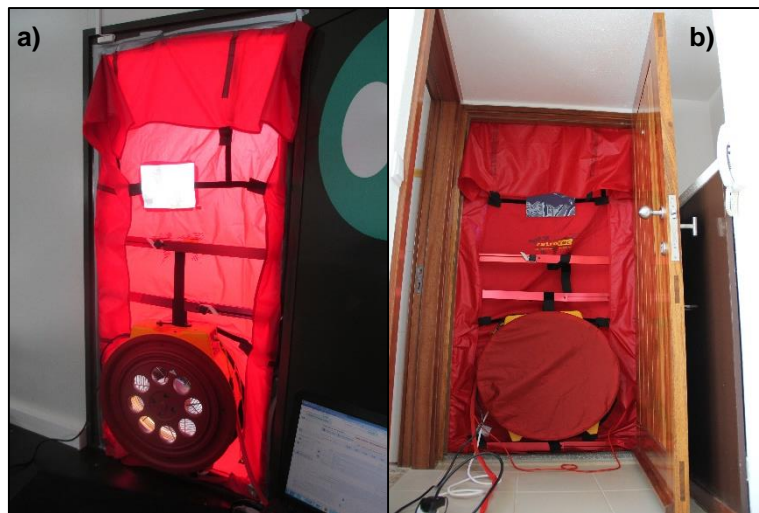


Figura 3.5 - Ventilador na posição final. a) Ventilador em posição para despressurização; b) Ventilador coberto para obtenção dos diferenciais de pressão com fluxo nulo.

Finalmente, os tubos com sondas devem ser conectados ao ventilador e ao medidor digital, para medição das pressões. O tubo vermelho deverá ser colocado no exterior da habitação, longe do raio de ação do ventilador, enquanto os restantes devem ser espalhados pelas várias divisões da fração em teste.

Na Figura 3.6 são visíveis as ligações realizadas entre o ventilador e o manómetro e entre este dispositivo e o computador portátil com o *software*, utilizado nos casos de estudo da presente dissertação.

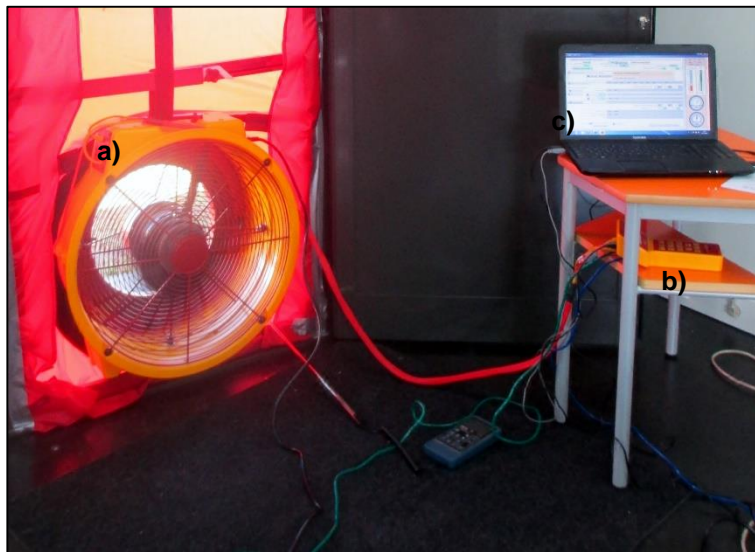


Figura 3.6 - Ligações entre os vários componentes de ensaio. a) Ventilador; b) Medidor digital; c) Computador portátil.

3.2.3. REALIZAÇÃO DO ENSAIO UTILIZANDO O SOFTWARE FANTESTIC

É possível optar por duas metodologias diferentes para a realização dos ensaios, ou seja, o técnico pode realizar o ensaio utilizando apenas o manómetro conectado ao ventilador para obtenção de resultados ou então através do método automático realizado através do *software* associado ao equipamento. O manómetro digital apresenta resultados em várias unidades enquanto o *software*, embora apresente resultados semelhantes, irá proporcionar uma análise de dados mais complexa que influenciará os resultados obtidos.

No trabalho desenvolvido nesta dissertação recorreu-se ao *software Fantestic* associado à norma EN13829.

No menu inicial são visíveis as opções “*Novo teste*” e uma listagem de todos os ensaios anteriormente realizados. É importante ter em atenção, quando se inicia o programa, qual a norma selecionada.

Após o início do teste o programa pedirá um conjunto de dados de entrada, relativos às condições de ensaio e do edifício em estudo. Todos os campos a preencher aparecem sinalizados através de caixas amarelas, tornando-se verdes após o preenchimento (Figura 3.7).

Altitude	<input type="text"/> m	Volume, V	<input type="text"/> m ³
Altura do edifício acima do solo	<input type="text"/> m	Área total envolvente, A _E	<input type="text"/> m ²
Exposição do edifício ao vento	<div> <div>Selecione a exposição...</div> <div> <div>Selecione a exposição...</div> <div>Edifício fortemente protegido</div> <div>Edifício parcialmente protegido</div> <div>Edifício fortemente exposto</div> </div> </div>	Superfície, A _F	<input type="text"/> m ²
		Precisão das medidas do edifício, + / -	<input type="text"/> %
		Localização do operador	<input type="text" value="No interior"/>
		Temperatura, inicial	Interior <input type="text"/> °C Exterior <input type="text"/> °C

Figura 3.7 - Dados de entrada. Informação relativa ao edifício.

As variáveis solicitadas pelo programa são:

- Modelo do ventilador.
- Altitude [m]: A altura acima do nível do mar é requerida para aplicação de uma pequena correção no caudal de ar registado;
- Altura do edifício acima do solo [m]: Este valor é utilizado para verificar a condição “altura” × “diferença de temperatura” inferior a 500 m. °C de acordo com a norma EN13829;
- Exposição do edifício ao vento: De entre as opções disponíveis deve ser escolhida a opção mais próxima da realidade. As opções são “Edifício fortemente protegido”, “Edifício parcialmente protegido” ou “Edifício fortemente exposto”;
- Volume, V [m³]: Para obtenção do valor de Rph₅₀ é necessário contabilizar este valor;
- Área total da envolvente, A_E [m²]: Contabilização da área da envolvente;
- Área de superfície, A_F (m²): Também designada por área de pavimento é a contabilização da área interior da fração;
- Precisão das medidas do edifício, + / -: Esta percentagem é utilizada para cálculo da incerteza, normalmente adotado 95 %;
- Pressão barométrica (kPa): De acordo com a norma EN13829 é utilizado o valor de 101,325 kPa;
- Velocidade do vento (Beaufort): Deve ser feita a medição da velocidade do vento antes e após o ensaio e convertida para a escala de Beaufort (Anexo 2).
- Localização do operador: Onde se encontra o técnico que irá realizar o ensaio (tipicamente no interior);
- Temperatura inicial (interior e exterior): Registo da temperatura antes do início do ensaio, no interior e exterior da fração;
- Temperatura final (interior e exterior): Registo da temperatura no final do ensaio, no interior e exterior da fração;

O programa faz o registo automático da hora de início e final de ensaio. Pressionando a opção “*Begin Automatic Test*” o ensaio é iniciado, irá aparecer uma mensagem emitida pelo *software* pedindo que o ventilador seja coberto. Esta ação serve para que sejam feitas as leituras necessárias para obtenção dos diferenciais de pressão entre o interior e o exterior do edifício com fluxo nulo inicial (nos casos de estudo realizados foram feitas 10 medições com intervalos de 20 segundos). Após o registo de todos os pontos o

ventilador deverá ser descoberto seguindo-se o registo do fluxo às pressões de referência, neste caso para as pressões de 10, 20, 30, 40 e 50 Pa.

Nesta fase podem surgir duas situações que exigem a alteração do anel em utilização:

- Pressão insuficiente: Neste caso a mensagem “TOO LOW” aparecerá no ecrã. É necessária a troca de anel para um de gama inferior.
- Pressão não atingida: Esta situação acontece quando a pressão desejada não é atingida embora o ventilador se encontre à velocidade máxima. É necessário trocar o anel para um de gama superior permitindo o aumento de caudal.

Após o registo dos fluxos obtidos às pressões de referência, o ventilador deverá ser novamente coberto para que o *software* proceda ao registo final dos diferenciais de pressão entre o interior e exterior do edifício. Após este registo o ensaio fica concluído, gerando os parâmetros finais tal como representado na Figura 3.8.




Correlação, r [%]	79,43	Limite de confiança de 95%			 Calcular
Coefficiente de fluxo de ar, C_{env} [$m^3/h \cdot Pa^n$]	79,05	29,65	211,0		
Coefficiente de fluxo de ar, C_L [$m^3/h \cdot Pa^n$]	79,574	29,85	212,0		 Eliminar dados
Pendente, n	0,2155	-0,0873	0,5183		 Clear point...
	Resultados	Intervalo de confiança de 95%		Incerteza	
Fluxo de ar a 50 Pa, V_{50} [m^3/h]	185,0	139,5	245,0	+/-28,6%	
Modificação do ar a 50 Pa, n_{50} [/h]	0,9990	0,6965	1,300	+/-30,3%	
Permeabilidade a 50 Pa, q_{50} [$m^3/h \cdot m^2$]	1,528	1,065	1,991	+/-30,3%	
Fuga específica a 50 Pa, w_{50} [$m^3/h \cdot m^2$]	3,933	2,741	5,125	+/-30,3%	

Figura 3.8 - Resultados gerados pelo *software Fantestic*. Exemplo caso de estudo 2.

O programa permite ainda a obtenção de resultados sem a introdução dos dados relativos às temperaturas e à intensidade do vento, podendo estas ser introduzidas mais tarde sem que seja necessário estar ligado ao sistema da porta ventiladora. Todos os restantes dados relativos às dimensões do edifício podem também ser modificados posteriormente. Carregando na opção “Calcular” o *software* irá emitir novos resultados adaptados às novas variáveis introduzidas.

3.2.4. ELEMENTOS DE APOIO PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios é necessário o registo de diversos valores que caracterizam o espaço em estudo assim como dos valores obtidos. Foram realizadas duas fichas de ensaio, que atuam como um formulário para um ensaio à permeabilidade da envolvente de determinado edifício, no âmbito da norma ISO 9972.

Para a realização do ensaio o técnico deverá levar consigo a ficha de inspeção onde poderá, de forma organizada, registar todos os dados e resultado.

Estas fichas dividem-se em duas categorias:

- Ficha técnica para avaliação Rph pelo método A;
- Ficha técnica para avaliação Rph pelo método B.

Ficha técnica – Método A

A primeira parte desta ficha corresponde à identificação geral do edifício e ao tipo de ensaio a ser realizado. São registadas as informações relativas à data e hora de realização do ensaio, sendo também solicitada a identificação do técnico que o realizou. Está ainda disponível um campo para notas adicionais (Figura 3.9).

Data: __/__/__	Hora: __:__	Técnico: _____							
INFORMAÇÃO DO EDIFÍCIO									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Localização:</td></tr> <tr><td>Morada:</td></tr> <tr><td>Tipologia:</td></tr> <tr><td>Estado de conservação:</td></tr> <tr><td>Tipo de AVAC:</td></tr> </table>		Localização:	Morada:	Tipologia:	Estado de conservação:	Tipo de AVAC:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Notas adicionais:</td></tr> <tr><td style="height: 100px;"></td></tr> </table>	Notas adicionais:	
Localização:									
Morada:									
Tipologia:									
Estado de conservação:									
Tipo de AVAC:									
Notas adicionais:									
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30px; text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>Pressurização</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>Despressurização</td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/>	Pressurização	<input type="checkbox"/>	Despressurização				
<input type="checkbox"/>	Pressurização								
<input type="checkbox"/>	Despressurização								

Figura 3.9 - Parte inicial da ficha de ensaio relativa ao edifício ensaiado.

A secção seguinte (Figura 3.10) contempla todos os dados de entrada necessários para a realização do ensaio. Este conjunto de informação é solicitada pelo *software Fantestic* para a correta obtenção do valor de R_{ph50} . Inclusive é solicitado o cálculo da condição exigida pela norma EN 13829 que indica que o produto da altura do edifício com a diferença de temperatura entre o interior e o exterior da habitação, na altura em que decorre o ensaio, seja inferior a 500 m.°C. Todos os restantes campos solicitados encontram-se explanados no ponto 3.2.4 da presente dissertação.

DADOS:

Nível de Precisão	<input type="text"/>	[%]	Volume, V	<input type="text"/>	[m ³]
Elevação	<input type="text"/>	[m]	Área Envolvente Exterior, A _{env}	<input type="text"/>	[m ²]
*Altura Edifício	<input type="text"/>	[m]	Área Útil, A _u	<input type="text"/>	[m ²]
Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]
Inicial	<input type="text"/>	[m/s]			
Temperatura Inicial	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior	
Humidade Relativa	<input type="text"/>	[%] Interior	<input type="text"/>	[%] Exterior	
Altura Edifício × Δt:	<input type="text"/>	<500 m.°C			

Figura 3.10 - Dados de entrada solicitados pelo software *Fantestic*.

As secções que se seguem são utilizadas para registo dos dados *output* do programa, pretende-se assim obter um registo dos dados mais importantes para avaliação da fração a ensaio. O primeiro campo (Figura 3.11) solicita o registo dos diferenciais de pressão obtido inicialmente, a pressão a que se encontra o edifício, a pressão registada pela porta e os diferenciais de pressão finais. Este campo pode ser considerado facultativo, no entanto poderá servir para detetar possíveis erros. Por exemplo, no caso de variações elevadas, poderá ser indicativo que o vento está a mover o tubo colocado no exterior, ou que este se encontra molhado, podendo prejudicar os resultados finais de ensaio.

RESULTADOS:												
Pressão Diferencial Inicial [Pa]												
Tempo por Diferencial de Pressão: _____ s							ΔP_{01} : _____ ΔP_{01-} : _____ ΔP_{01+} : _____					
Pressão Edifício [Pa]												
Pressão Porta Ventiladora [Pa]												
Tempo por Leitura de Pressão: _____ s												
Pressão Diferencial Final [Pa]												
							ΔP_{02} : _____ ΔP_{02-} : _____ ΔP_{02+} : _____					

Figura 3.11 - Primeiro campo da secção de resultados da ficha de ensaio para registo de diferenciais de pressão.

Na Figura 3.12 encontram-se os campos relativos ao registo das temperaturas finais no interior e exterior do edifício assim como a velocidade e direção do vento no final de ensaio. Estes dados podem ser posteriormente inseridos no programa. Está também disponível um campo para registo dos caudais obtidos às várias pressões induzidas com nível de incerteza associado. Posteriormente pode ser observada a evolução dos caudais de ar com a evolução da pressão induzida pelo ventilador.

Velocidade do Vento Final	<input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/>	[Beaufort] [m/s]	Direção do Vento	<input style="width: 100%;" type="text"/>	[°]
Temperatura Final	<input style="width: 100%;" type="text"/>	[°C] Interior	<input style="width: 100%;" type="text"/>	[°C] Exterior	
Fluxo Total [m³/h]					
Fluxo Corrigido [m³/h]					
Incerteza [%]					

Figura 3.12 - Dados finais de ensaio e resultados relativos aos fluxos obtidos.

Na Figura 3.13 está disponível a secção relativa ao registo dos dados mais relevantes do ensaio de pressurização/ despressurização que possibilitam a caracterização da envolvente em estudo.

Caudal de ar infiltrado pela envolvente V_{50} <input type="text"/> [m ³ /h] <input type="text" value="Incerteza"/>	Coefficiente de Escoamento de Ar C_{env} <input type="text"/> [m ³ /h.Pa ⁿ]
Renovações por Hora Rph_{50} <input type="text"/> [h ⁻¹] <input type="text" value="Incerteza"/>	Coefficiente de Infiltração de Ar C_L <input type="text"/> [m ³ /h.Pa ⁿ]
Razão entre caudal escoado e área da envolvente q_{50} <input type="text"/> [m ³ /h.m ²] <input type="text" value="Incerteza"/>	Expoente de Escoamento n <input type="text"/> [-]
Razão entre caudal de ar escoado e área útil w_{50} <input type="text"/> [m ³ /h.m ²] <input type="text" value="Incerteza"/>	Correlação r <input type="text"/> [%]

Figura 3.13 - Listagem dos parâmetros caracterizadores da permeabilidade ao ar.

A ficha possui ainda um campo para observações finais que o técnico possa achar relevante registar. A ficha completa pode ser consultada no Anexo 3.

Ficha técnica – Método B

A ficha idealizada para realização de um ensaio pelo método B apresenta algumas modificações em relação à anteriormente apresentada, podendo esta ser utilizada como complementar à anterior. A ficha pelo método A apresenta uma caracterização geral do edifício, ou seja, dados que são comuns a todos os ensaios, enquanto que a agora apresentada está direccionada para a avaliação, ensaio a ensaio, dos vários elementos construtivos.

Na parte inicial da ficha, Figura 3.14, é possível seleccionar o tipo de ensaio e registar os dados relativos à velocidade e direcção do vento, temperaturas e humidade relativa no interior e exterior no início do ensaio.

Data: ____/____/____	Hora: ____:____	Técnico: _____																								
<input type="checkbox"/> Pressurização <input type="checkbox"/> Despressurização																										
DADOS:																										
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 40%;">Velocidade do Vento</td> <td style="width: 10%;"><input type="text"/></td> <td style="width: 10%;">[Beaufort]</td> <td style="width: 40%;">Direção do Vento</td> <td style="width: 10%;"><input type="text"/></td> <td style="width: 10%;">[°]</td> </tr> <tr> <td> Inicial</td> <td><input type="text"/></td> <td>[m/s]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Temperatura Inicial</td> <td><input type="text"/></td> <td>[°C] Interior</td> <td><input type="text"/></td> <td>[°C] Exterior</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Humidade Relativa</td> <td><input type="text"/></td> <td>[%] Interior</td> <td><input type="text"/></td> <td>[%] Exterior</td> <td></td> </tr> </table>			Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]	Inicial	<input type="text"/>	[m/s]				Temperatura Inicial	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior		Humidade Relativa	<input type="text"/>	[%] Interior	<input type="text"/>	[%] Exterior	
Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]																					
Inicial	<input type="text"/>	[m/s]																								
Temperatura Inicial	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior																						
Humidade Relativa	<input type="text"/>	[%] Interior	<input type="text"/>	[%] Exterior																						

Figura 3.14 - Parte inicial ficha de ensaio método B.

Esta ficha difere da anteriormente apresentada pois possui uma secção onde é possível registar dados relativos aos vários elementos a considerar no ensaio com a respetiva metodologia adotada (selado ou não selado) e dimensões que possam ser úteis (Figura 3.15). Encontra-se ainda disponível um campo para registo dos indicadores de permeabilidade obtidos.

Elemento Construtivo	Selado	Não Selado	Dimensões	

RESULTADOS:		
V_{50}	<input type="text"/>	[m ³ /h]
R_{ph50}	<input type="text"/>	[h ⁻¹]
q_{50}	<input type="text"/>	[m ³ /h.m ²]
w_{50}	<input type="text"/>	[m ³ /h.m ²]
C	<input type="text"/>	[m ³ /h.Pa ^a]
n	<input type="text"/>	[-]
r	<input type="text"/>	[%]

Figura 3.15 - Caraterização da metodologia adotada por elemento. Resultados do ensaio.

A secção final é constituída pelo campo onde devem ser registados os valores relativos à velocidade e direção do vento assim como as temperaturas no interior e exterior no final do ensaio. É disponibilizado ainda um espaço para observações, (Figura 3.16)

Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]
Final	<input type="text"/>	[m/s]			
Temperatura Final	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior	

OBSERVAÇÕES:

Figura 3.16 - Parte final ficha de ensaio método B.

4

CARATERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

4.1. CASO DE ESTUDO 1

4.1.1. CARATERIZAÇÃO GERAL

O edifício sujeito a ensaio trata-se de uma estrutura pré-fabricada, representado nas Figura 4.1 e Figura 4.2, que servirá para a realização de reuniões, atividades escolares, entre outros. É assim um edifício “multifunções” que pode ser equiparado a uma sala de aula.

Trata-se de um projeto recente, com utilização de alguns elementos construtivos não comuns, sendo assim de elevado interesse proceder à sua avaliação e caracterização.

A estrutura é constituída apenas por um piso e as suas dimensões encontram-se sintetizadas no Quadro 4.1.

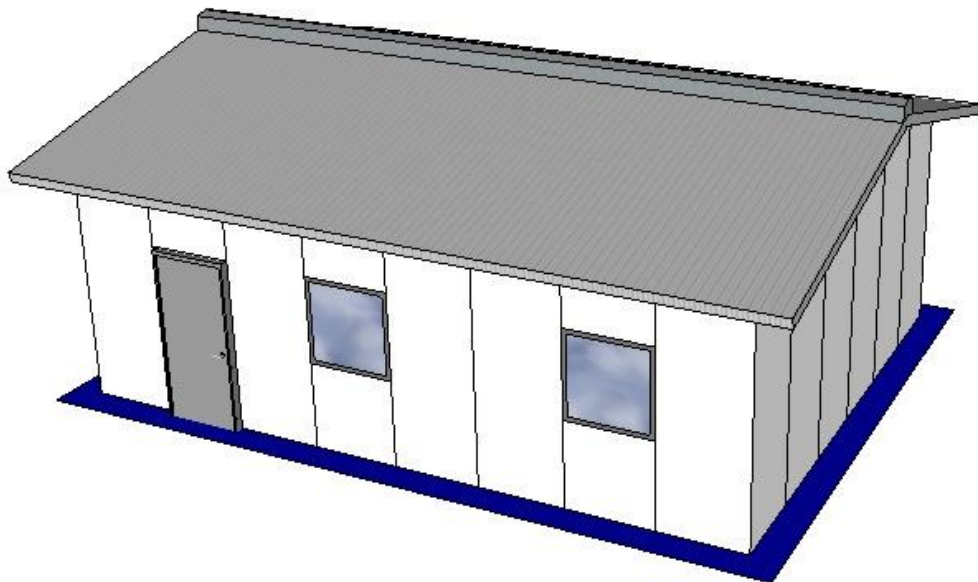


Figura 4.1 - Representação esquemática do edifício ensaiado (vista geral).

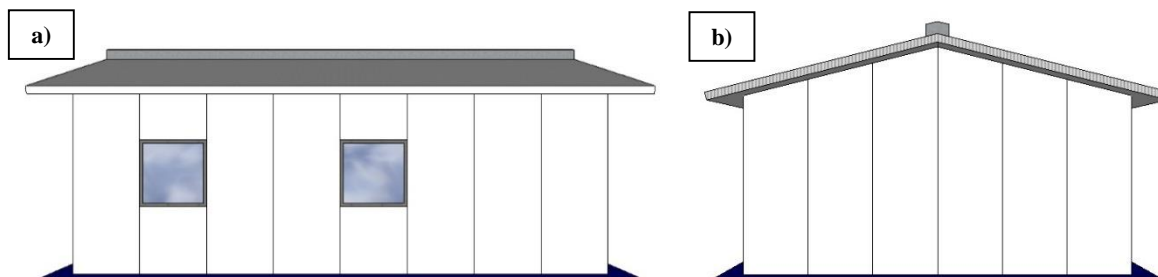


Figura 4.2 - Representação esquemática do edifício estudado. a) Vista posterior; b) Vista lateral esquerda e direita.

Quadro 4.1 - Características do edifício estudado.

Altitude	Altura	Volume	Área envolvente	Área Útil	Número Janelas	Área total de janelas
[m]	[m]	[m ³]	[m ²]	[m ²]		[m ²]
25,00	3,30	149,30	178,26	47,88	4	24,62

Relativamente aos elementos deste edifício, as janelas são de classe de permeabilidade 4 constituídas por caixilharia metálica de tecnologia basculante, com 1,03 m de altura por 1,00 m de comprimento. A porta é em alumínio, com 1,00 m de comprimento e 1,96 m de altura. As paredes e teto são constituídos por painéis metálicos com 2,75 m de altura e 1,00 m de comprimento. O cume ventilado é uma estrutura metálica ao longo do comprimento do edifício que possui dezoito aberturas com área de $12,50 \times 2,00 \text{ cm}^2$.

4.1.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE

Este edifício foi ensaiado no concelho de Matosinhos, pertencente ao distrito do Porto. O edifício encontra-se em zona relativamente perto da costa, Figura 4.3.

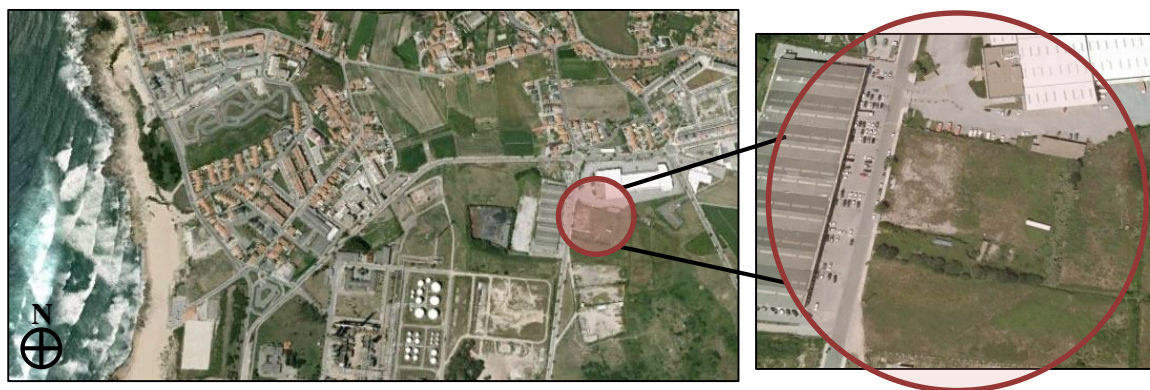


Figura 4.3 - Localização do edifício estudado.

4.1.3. CLIMA

Os ensaios foram realizados no dia 3 de março de 2014. Foram registados os valores da velocidade do vento e da temperatura interior e exterior, no início e final de cada ensaio. Estes dados são essenciais para garantir a validade do ensaio de acordo com a norma ISO 9972:2012, sendo que a velocidade do vento deverá ser inferior a 3 o que corresponde a um limite de 6 m/s (a escala de Beaufort poderá ser consultada no Anexo 2). Relativamente à temperatura, a norma especifica que o produto da diferença de temperaturas interior e exterior e a altura do edifício terá que ser menor que 500 m.°C (equação 4.1) sendo que para este caso o valor mais gravoso corresponde a uma diferença de temperatura interior e exterior de 5,5 °C (ensaio 4). Os dados recolhidos encontram-se disponíveis para consulta no Quadro 4.2.

$$500 \text{ m.}^{\circ}\text{C} > [T_i - T_e] \cdot h_{\text{fração}}(m) \quad (=) \quad 500 > [25,7 - 20,2] \cdot 3,3 \quad (=) \\ (=) \quad 500 > 18,15 \quad \text{O.K.} \quad (4.1)$$

Quadro 4.2 - Valores da velocidade do vento e temperaturas interior e exterior por ensaio.

Ensaio	Tipo	Velocidade do Vento [m/s]		Temperatura interior [°C]		Temperatura exterior [°C]	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	D	0,5	0,6	21,0	20,8	19,0	18,9
2	D	1,8	1,6	25,7	25,3	21,5	21,0
3	D	1,6	1,4	25,3	25,0	22,0	21,4
4	D	0,9	0,5	23,3	25,7	20,8	20,2
5	D	0,8	1,2	23,5	24,0	20,3	20,3

4.1.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RPH PELO NOVO REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

Para a determinação do valor de Rph de acordo com a formulação proposta pelo REH, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) fornece uma folha de cálculo que permite através da introdução de alguns dados obter o valor estimado das renovações por hora do edifício em causa.

Os valores introduzidos na aplicação desta metodologia ao caso de estudo encontram-se disponíveis para consulta nos Quadro 4.3, Quadro 4.4, Quadro 4.5.

Quadro 4.3 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos ao enquadramento do edifício.

Enquadramento do edifício	
Tipo de edifício	Habitação nova
Local (município)	Porto
Região	A
Rugosidade	I
Altitude do local [m]	25
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)	2 ou mais
Existem edifícios/ obstáculos à frente das fachadas?	Não
Altura do edifício (H_{edif}) [m]	3,3
Altura da fração (H_{FA}) [m]	3,3
Área útil [m ²]	47,9
Pé direito [m]	3,30
Nº de pisos da fração	1

Quadro 4.4 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos à permeabilidade ao ar da envolvente.

Permeabilidade ao ar da envolvente		
Para cada Vão (janela/porta) ou grupo de vãos	Área dos vãos [m ²]	4,12
	Classe de permeabilidade ao ar caixilharias	4
	Permeabilidade ao ar das caixas de estore	Não tem

Quadro 4.5 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos às aberturas de admissão de ar na envolvente.

Aberturas de admissão de ar na envolvente	
Tem abertura de admissão de ar na envolvente	Sim
Tipo de abertura	Fixa ou regulável manualmente
Área livre das aberturas fixas [cm ²]	900

Após a introdução de todas as variáveis na folha de cálculo conseguimos obter a estimativa para o valor de R_{ph} natural.

Procedeu-se à determinação do valor de R_{ph} , tendo em conta o valor de R_{ph50} medido nos ensaios com porta ventiladora e sem este valor (Quadro 4.6), já que a folha de cálculo permite obter uma estimativa para ambas as situações.

Para a obtenção do valor de R_{ph} com a variável R_{ph50} (obtido através do ensaio) utilizou-se o valor do ensaio número 5, ensaio realizado em condições de funcionamento ($R_{ph50} = 21,30 \text{ h}^{-1}$).

No Quadro 4.6 faz-se ainda a comparação destes valores com o normalmente adotado proveniente da aproximação $R_{ph_{nat}} = R_{ph50}/20$.

Quadro 4.6 - Comparação entre os diferentes valores de R_{ph} .

$R_{ph} [\text{h}^{-1}]$		
REH sem valor de R_{ph50}	REH com valor de R_{ph50}	Aproximação $R_{ph50}/20$
1,75	2,00	1,07

4.2. CASO DE ESTUDO 2

4.2.1. CARATERIZAÇÃO GERAL

O fogo ensaiado faz parte do complexo habitacional de Lordelo do Ouro (Figura 4.4). Este complexo foi também utilizado para realização do caso de estudo 3, estando nessa secção todos os pormenores relativos aos edifícios. O projeto de origem data de novembro de 1974 tendo sido realizadas obras de reabilitação entre 2009 e 2010.

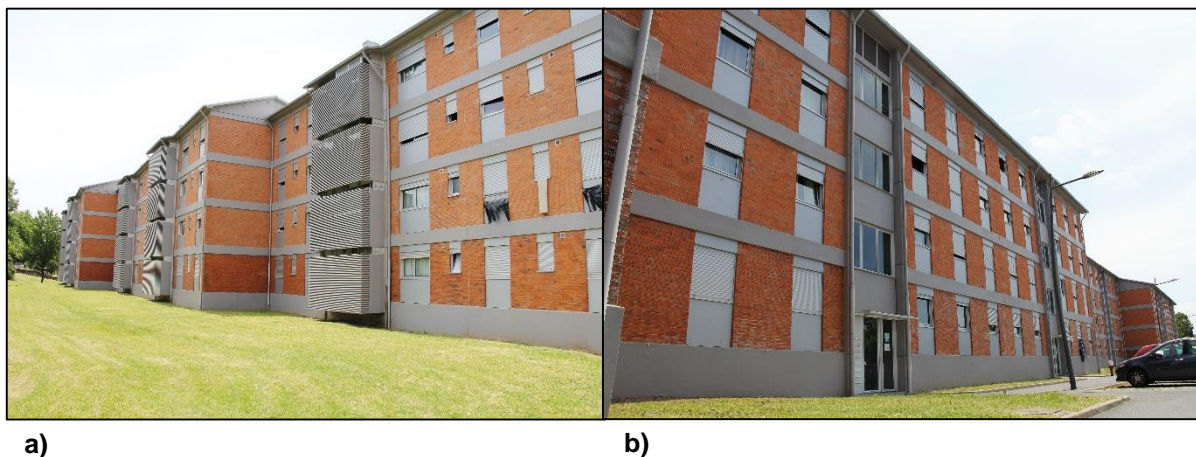


Figura 4.4 - Fachadas do edifício. a) Fachada orientada a Nordeste; b) Fachada orientada a Sudoeste.

O apartamento em estudo (Figura 4.6) situa-se no bloco 14, entrada 140, no primeiro piso, é de tipologia T4, possui duas frentes com empena parcial e encontra-se inabitado, ou seja, não foram feitas quaisquer alterações às condições iniciais após a reabilitação. É composto por uma cozinha, uma casa de banho, sala, lavandaria e quatro quartos. No Quadro 4.7 encontra-se a listagem das suas dimensões assim como dados relativos aos elementos constituintes da sua envolvente.

Quadro 4.7 - Caraterísticas do apartamento ensaiado.

Altitude	Altura	Tipologia	Volume	Área envolvente	Área Útil	Número Janelas	Área total de janelas
[m]	[m]		[m ³]	[m ²]	[m ²]		[m ²]
20	12	T4	185	47,50	74,00	7	13,385

Foram realizadas medições e levantamento dos componentes necessários de modo a ser possível a realização da planta disponível na Figura 4.5.

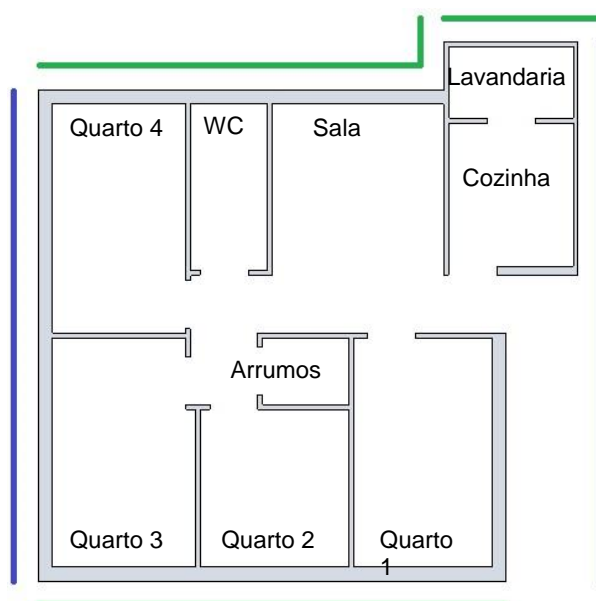


Figura 4.5 - Planta do apartamento ensaiado.

As cotas apresentadas a cor verde e a cor azul representam as paredes em contacto com o exterior e com as habitações adjacentes, respetivamente.

Os pormenores relativos aos elementos construtivos que o constituem são os seguintes:

- Paredes: Constituídas por uma camada exterior em tijolo com face à vista e uma camada interior em alvenaria;
- Janelas: Constituídas por caixilharia de alumínio e vidro duplo incolor. Classe de permeabilidade 3. Relativamente à sua tecnologia, as janelas dos quartos possuem abertura basculante e a da sala tecnologia de correr;
- Caixas de estore: Este elemento é em madeira e os estores em material metálico.

Sistema de ventilação misto constituído por:

- Admissão de ar: Através de grelhas autorreguláveis localizadas nos compartimentos secos e instaladas nas caixas de estore;
- Extração de ar: Realizada por extração mecânica nos compartimentos de serviço. Uma grelha de extração posicionada na parede de fachada da casa de banho, um extrator mecânico coletivo posicionado na cozinha (o seu funcionamento é intermitente, sendo interrompido durante algumas horas) e uma abertura permanente localizada na parede lateral da lavandaria.

4.2.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE

O fogo ensaiado fica situado no Bairro de Lordelo, freguesia de Lordelo do Ouro, no concelho do Porto. Possui duas frentes, onde a sala, um quarto, casa de banho e cozinha estão direcionados a Nordeste e os restantes três quartos a Sudoeste.



Figura 4.6 - Localização do apartamento estudado.

4.2.3 CLIMA

Os ensaios foram realizados no dia 26 de maio de 2014. Os valores apresentados no Quadro 4.8 para as temperaturas exteriores de cada ensaio assim como velocidade e direção do vento foram registados a partir da informação disponibilizada pela estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC-FEUP). Estes dados são essenciais para garantir a validade de cada ensaio de acordo com a norma ISO 9972:2012, sendo que a velocidade do vento deverá

ser inferior a 3 o que corresponde a um limite de 6 m/s (esta escala encontra-se disponível no Anexo 2). Relativamente à temperatura, a norma especifica que o produto da diferença de temperaturas interior e exterior e a altura do edifício terá que ser menor que 500 m.°C (equação 4.2), analisando o caso em questão, identifica-se como caso mais gravoso os ensaios 1 a 4, correspondente a uma diferença de 4 °C.

$$500 \text{ m.}^{\circ}\text{C} > [T_i - T_e] \cdot h_{\text{fração}}(m) (=) 500 > [18 - 14] \cdot 3,00 (=) \\ (=) 500 > 12,00 \quad \text{O.K.} \quad (4.2)$$

Quadro 4.8 - Informações relativas à direção e velocidade do vento, temperaturas interior e exterior por ensaio.

Ensaio	Tipo	Vento		Temperatura interior [°C]	Temperatura exterior [°C]
		Direção	Velocidade		
1	P	Sudoeste	1	18	14
2	P	Sudoeste	1	18	14
3	P	Sudoeste	1	18	14
4	P	Sudoeste	1	18	14
5	P	Sudeste	1	18	15
6	P	Sudeste	1	18	15
7	P	Sudeste	1	18	15
8	P	Sudeste	1	18	15
	D	Sudeste	1	18	15

Nota: A velocidade do vento está de acordo com a escala de Beaufort.

4.2.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RPH PELO NOVO REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

Foi utilizada, mais uma vez, a folha disponibilizada pelo LNEC para realização da estimativa relativa ao valor estimado de renovações por hora do fogo em causa.

O presente caso de estudo tem como particularidade a necessidade de contabilizar as grelhas de admissão autorreguláveis instaladas nas caixas de estore dos compartimentos secos, Figura 4.7. Existem no total seis grelhas autorreguláveis (uma por quarto, duas na sala) com um caudal de 30 m³/h por grelha.



Figura 4.7 - Grelhas autorreguláveis aplicadas na caixa de estore.

Os valores introduzidos na folha de cálculo encontram-se disponíveis para consulta nos Quadro 4.9, Quadro 4.10 e Quadro 4.11.

Quadro 4.9 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos ao enquadramento do edifício.

Enquadramento do edifício	
Tipo de edifício	Habitação nova
Local (município)	Porto
Região	A
Rugosidade	I
Altitude do local [m]	20
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)	2 ou mais
Existem edifícios/ obstáculos à frente das fachadas?	Não
Altura do edifício (H_{edif}) [m]	12
Altura da fração (H_{FA}) [m]	3
Área útil [m ²]	74,00
Pé direito [m]	2,70
Nº de pisos da fração	1

Quadro 4.10 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos à permeabilidade ao ar da envolvente.

Permeabilidade ao ar da envolvente		
Para cada Vão (janela/porta) ou grupo de vãos	Área dos vãos [m ²]	13,39
	Classe de permeabilidade ao ar caixilharias	3
	Permeabilidade ao ar das caixas de estore	Baixa

Quadro 4.11 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos às aberturas de admissão de ar na envolvente.

Aberturas de admissão de ar na envolvente	
Tem abertura de admissão de ar na envolvente	Sim
Tipo de abertura	Autorregulável
Área livre das aberturas fixas [cm ²]	0
Caudal Nominal aberturas autorreguláveis [m ³ /h]	180 (6 grelhas de 30 m ³ /h)

Obteve-se o valor de R_{ph} para três situações distintas. No primeiro caso foi utilizada a folha de cálculo sem inserir o valor de R_{ph50} , obtido pelos ensaios utilizando a porta ventiladora, no segundo caso foi inserida a variável R_{ph50} proveniente da média dos ensaios de pressurização e despressurização (ensaios 8 P e 8 D) do ensaio número oito descrito no ponto 5.2.2 da presente dissertação ($R_{ph50} = 6,16 \text{ h}^{-1}$). Finalmente no terceiro caso foi obtido o valor de renovações por hora utilizando a aproximação mencionada em 2.2.4. No Quadro 4.12 podem ser comparados os valores obtidos para as três situações mencionadas.

Quadro 4.12 - Comparação entre os diferentes valores de R_{ph} .

$R_{ph} [\text{h}^{-1}]$		
REH sem valor de R_{ph50}	REH com valor de R_{ph50}	Aproximação $R_{ph50}/20$
0,50	1,09	0,31

4.3. CASO DE ESTUDO 3

4.3.1. CARATERIZAÇÃO GERAL

Os edifícios em estudo fazem parte do complexo habitacional de Lordelo estando parte da sua fachada representada na Figura 4.8. O projeto de origem data de novembro de 1974 tendo sido realizadas obras de reabilitação entre 2009 e 2010.

É constituído por quatro blocos, perfazendo um total de 178 habitações, incluindo 19 fogos de tipologia T1, 31 fogos tipologia T2, 72 fogos tipologia T3, 56 fogos tipologia T4 e 1 fogo T5 (situado na cave de um dos blocos).

Nos ensaios realizados foram estudados apenas os apartamentos de tipologia T1, T3 e T4. Estes ensaios decorreram em maio de 2013 no âmbito de uma tese realizada para avaliação da estanquidade ao ar de edifícios de habitação (*Machado, 2013*).



Figura 4.8 - Fachada pertencente a dois dos edifícios do complexo habitacional de Lordelo.

Cada um dos blocos é constituído por 3 pisos elevados. No Quadro 4.13 podem ser observadas as dimensões das diferentes tipologias assim como dados relativos aos elementos constituintes da sua envolvente. É importante referir que a disposição das divisões de cada tipologia não apresenta diferenças nos vários apartamentos.

Quadro 4.13 - Características dos edifícios em estudo.

Altitude	Altura	Tipologia	Volume	Área envolvente	Área Útil	Número Janelas	Área total de janelas
[m]	[m]		[m ³]	[m ²]	[m ²]		[m ²]
20	12	T1	100	44,25	40,00	4	9,425
		T3	160	36,75	63,60	6	12,065
		T4 ^a	185	57,50	74,00	7	13,385
		T4 ^b	185	46,75	74,00	7	13,385
		T4 ^b	185	47,50	74,00	7	13,385

Legenda: **a**: empena; **b**: empena parcial.

Relativamente aos elementos constituintes deste edifício, as paredes exteriores são constituídas por uma camada exterior em tijolo de face à vista e por uma camada interior em alvenaria, as janelas são de classe de permeabilidade 3, constituídas por caixilharia de alumínio, com tecnologia de correr, com vidro duplo incolor e estores metálicos.

A ventilação de cada fogo, atualmente mista, está assegurada através de quatro pontos principais. A admissão de ar é realizada através de grelhas de admissão autorreguláveis localizadas nas caixas de estore, a extração é feita por extração mecânica através de ventiladores com funcionamento descontínuo localizados na parede da fachada do edifício e por ventiladores mecânicos coletivos localizados nas cozinhas sendo o seu funcionamento interrompido durante algumas horas, existe ainda uma abertura permanente localizada na parede lateral da lavandaria de cada fogo.

Dos ensaios realizados foram constatadas grandes diferenças no valor de R_{ph50} apresentado pelas diferentes habitações, inclusive em apartamentos com a mesma tipologia (com igual área útil e área de vãos envidraçados). Estas diferenças podem ser justificadas pelas alterações feitas pelos moradores nos elementos de ventilação. As alterações mais significativas registadas em alguns dos apartamentos foram as seguintes:

- Ventilação na cozinha selada (Figura 4.9 a);
- Ventilação na casa de banho com colocação de grelha sem ventilador (Figura 4.9 b);
- Abertura na lavandaria selada (Figura 4.9 c);
- Janela parcialmente revestida ou preenchida com revestimento (Figura 4.9 d).
- Grelhas autorreguláveis seladas (Figura 4.12);



Figura 4.9 - Alteração, pelos moradores, das soluções iniciais de ventilação. Adaptado de Machado, 2013.

Uma síntese das alterações realizadas pelos habitantes de cada fogo pode ser consultada no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 - Descrição das alterações realizadas pelos ocupantes dos apartamentos nos diferentes sistemas de ventilação.

Tipologia	Número de fogos	Grelhas autorreguláveis	Ventilação Cozinha	Ventilação WC	Abertura Lavandaria
T1	1	N	AS	N	N
T1	3	N	S	N	N
T3	7	N	S	N	N
T3	2	N	S	N	A
T3	1	N	S	N	S
T3	1	N	S	N	PCR
T3	1	N	S	M	S
T3	1	N	S	GSV	N

T3	1	S	S	N	N
T3	1	S	S	N	S
T4^a	1	N	S	N	N
T4^a	1	N	S	N	PCR
T4^b	1	N	S	N	S
T4^b	2	N	S	N	N
T4^c	1	N	S	GSV	N

Legenda: **AS**: Abertura selada, **GSV**: Grelha sem ventilador, **PCR**: Preenchido com revestimento, **JPS**: Janelas parcialmente revestidas; **a**: empena; **b**: empena parcial 1; **c**: empena parcial 2.

4.3.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE

Este complexo habitacional localiza-se no Bairro de Lordelo, Freguesia de Lordelo do Ouro, concelho do Porto. Como se pode observar na Figura 4.10, os edifícios em questão inserem-se no interior da malha urbana.

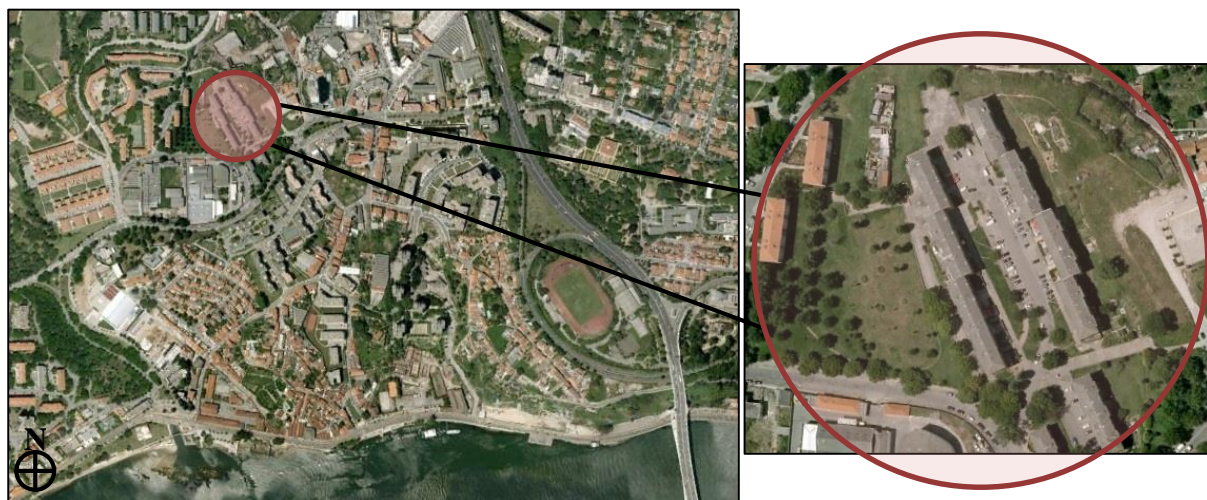


Figura 4.10 - Localização do edifício estudado.

4.3.3 CLIMA

Os ensaios foram realizados, ao longo de cinco dias, tendo sido registados os valores médios para a velocidade e direção do vento e respetivas temperaturas, com base nos dados disponibilizados pela estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC - FEUP). Estes valores estão disponíveis para consulta no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Valores médios da temperatura, velocidade e direção do vento para os diferentes dias de ensaio.
Adaptado de Machado, 2013.

Data	Hora	Temperatura Média	Velocidade do Vento	Direção do vento
		[°C]	[m/s]	[°]
20-05-2013	09:00 – 13:00	13,5	1,52	0,13
	14:00 – 17:00	18,2	1,83	0,10
21-05-2013	09:00 – 13:00	14,9	1,31	0,11
	14:00 – 17:00	19,5	1,79	0,10
22-05-2013	09:00 – 13:00	15,9	1,24	0,13
	14:00 – 17:00	21,0	1,83	0,12
28-05-2013	09:00 – 13:00	13,9	2,07	0,11
	14:00 – 17:00	16,1	2,35	0,15
31-05-2013	09:00 – 13:00	12,6	1,75	0,12

4.3.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR DE RPH PELO NOVO REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

No presente caso de estudo, existem várias tipologias a ser consideradas. Estamos perante habitações com diferente área útil e área de vãos envidraçados. Ainda dentro da mesma tipologia existem casos distintos, já abordados em 4.3.1, devido às alterações realizadas pelos ocupantes de cada fogo.

Pelas razões mencionadas será necessário enquadrar as variantes encontradas em casos diferentes para efeitos de cálculo. Os 25 fogos em causa serão inseridos em diferentes categorias. A cada categoria pertencerão os apartamentos com igual tipologia, área de vãos envidraçados, área útil e sistema/alteração de ventilação semelhante. Esta distinção é necessária devido às variáveis consideradas para o cálculo do valor de Rph pelo REH.

Nas habitações analisadas, apesar de haver alterações em vários sistemas de ventilação, serão apenas considerados três casos distintos:

- Grelhas no estado normal de funcionamento (Figura 4.11);
- Grelhas seladas (Quadro 4.12);
- Abertura na lavandaria (abertura realizada pelos ocupantes para colocação de tubo de extração de gases provenientes do esquentador, Figura 4.13).

Apenas são considerados estes três casos pois são aqueles que poderão ser considerados na folha de cálculo utilizada. Estas variáveis encontram-se contabilizadas no Quadro 4.16.



Figura 4.11 - Grelhas no estado normal de funcionamento.



Figura 4.12 – Grelhas com aplicação de fita adesiva.



Figura 4.13 - Abertura na lavandaria.

Quadro 4.16 - Casos de estudo em consideração de acordo com folha de cálculo fornecida pelo LNEC.

Caso	Tipologia	Número de Fogos	Volume [m ³]	Área Útil [m ²]	Área total de janelas [m ²]	Descrição Sistemas de Ventilação	Rph ₅₀ Médio Porta Ventiladora [h ⁻¹]
1	T1	4	100	40,00	9,43	GAR: Normal VWC: Normal AL: Normal	10,49
2	T3	11	160	63,60	12,07	GAR: Normal VWC: Normal AL: Normal ou Selada	6,95
3	T3	2	160	63,60	12,07	GAR: Normal VWC: Normal AL: Aberta	6,26
4	T3	2	160	63,60	12,07	GAR: Selada VWC: Normal AL: Normal ou Selada	3,97
5	T4	6	185	74,00	13,39	GAR: Normal VWC: Normal AL: Normal ou Selada	5,78

Legenda: **GAR:** Grelhas autorreguláveis; **VWC:** Ventilação casa de banho; **AL:** Abertura Lavandaria.

No caso 3, em particular, a abertura existente na lavandaria encontra-se, em condições normais, completamente obstruída pelo tubo de extração de gases provenientes do esquentador, daí o valor de R_{ph50} apresentado ser um pouco menor que, por exemplo, o caso 2 onde estão considerados os ensaios com a ventilação nesta divisão em condições normais e selados.

Os valores introduzidos na folha de cálculo, para os diferentes casos, encontram-se disponíveis para consulta nos Quadro 4.17, Quadro 4.18, Quadro 4.19.

Quadro 4.17 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos ao enquadramento do edifício.

Enquadramento do edifício	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Tipo de edifício	Habitação nova				
Local (município)	Porto				
Região	A				
Rugosidade	I				
Altitude do local [m]	20				
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)	2 ou mais				
Existem edifícios/ obstáculos à frente das fachadas?	Não				
Altura do edifício (H_{edif}) [m]	12				
Altura da fração (H_{FA}) [m]	12				
Área útil [m ²]	40,00	63,60	63,60	63,60	74,00
Pé direito [m]	2,70				
Nº de pisos da fração	1				

Quadro 4.18 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos à permeabilidade ao ar da envolvente.

Permeabilidade ao ar da envolvente	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Área dos vãos [m ²]	9,43	12,07	12,07	12,07	13,39
Para cada vão (janela/ porta) ou grupo de vãos	Classe de permeabilidade ao ar caixilharias				
	3				
	Permeabilidade ao ar das caixas de estore				
	Baixa				

Quadro 4.19 - Dados, para preenchimento da folha de cálculo fornecida pelo LNEC, relativos às aberturas de admissão de ar na envolvente.

Aberturas de admissão de ar na envolvente				
Caso	Abertura de admissão de ar na envolvente	Tipo de abertura	Área livre das aberturas fixas [cm ²]	Caudal Nominal aberturas autorreguláveis [m ³ /h]
1	Sim	Autorregulável	-	90 (3 grelhas de 30 m ³ /h)
2	Sim	Autorregulável	-	150 (5 grelhas de 30 m ³ /h)
3	Sim	Fixa + Autorregulável	176,70	150 (5 grelhas de 30 m ³ /h)
4	Não	-	-	-
5	Sim	Autorregulável	-	180 (6 grelhas de 30 m ³ /h)

Nota: Foram consideradas duas grelhas de admissão de ar por sala e uma por quarto.

Procedeu-se à obtenção do valor de R_{ph} através da folha de cálculo, com o valor de R_{ph50} obtido através da média dos ensaios de pressurização e despressurização (Quadro 4.16) resultado dos ensaios realizados por Machado (2013) na sua tese de dissertação e também sem este valor. No Quadro 4.20 podem ser comparados os valores obtidos através da folha de cálculo e pela aproximação mencionada no ponto 2.2.4 da presente dissertação.

Quadro 4.20 - Comparação entre os diferentes valores de R_{ph} .

R_{ph} [h ⁻¹]	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
REH sem valor de R_{ph50}	0,47	0,48	0,80	0,04	0,50
REH com valor de R_{ph50}	1,50	1,16	1,40	0,41	1,05
Valor ensaio $R_{ph50}/20$	0,52	0,35	0,31	0,20	0,29

4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS VALORES DE RPH

Os valores obtidos a partir da ferramenta de cálculo, nos três casos de estudo, estão disponíveis para consulta no Quadro 4.21 onde se podem avaliar as variações dos valores de Rph (h^{-1}) consoante a metodologia adotada. Apresenta-se ainda a relação entre a área de envidraçados e a área útil.

Quadro 4.21 - Análise comparativa dos valores obtidos de Rph, através das diferentes metodologias.

	Rph [h ⁻¹]			Relação área dos vãos envidraçados com a área útil [%]	
	REH com valor de Rph ₅₀	REH sem valor de Rph ₅₀	Aproximação Rph ₅₀ /20		
Caso 1	2,00	1,75	1,07	28	
Caso 2	1,09	0,56	0,31	18	
Caso 3	1	1,50	0,56	0,52	24
	2	1,16	0,48	0,35	19
	3	1,40	0,80	0,31	19
	4	0,41	0,04	0,20	19
	5	1,05	0,56	0,29	18

A Figura 4.14 apresenta graficamente os valores de Rph para os diferentes casos.

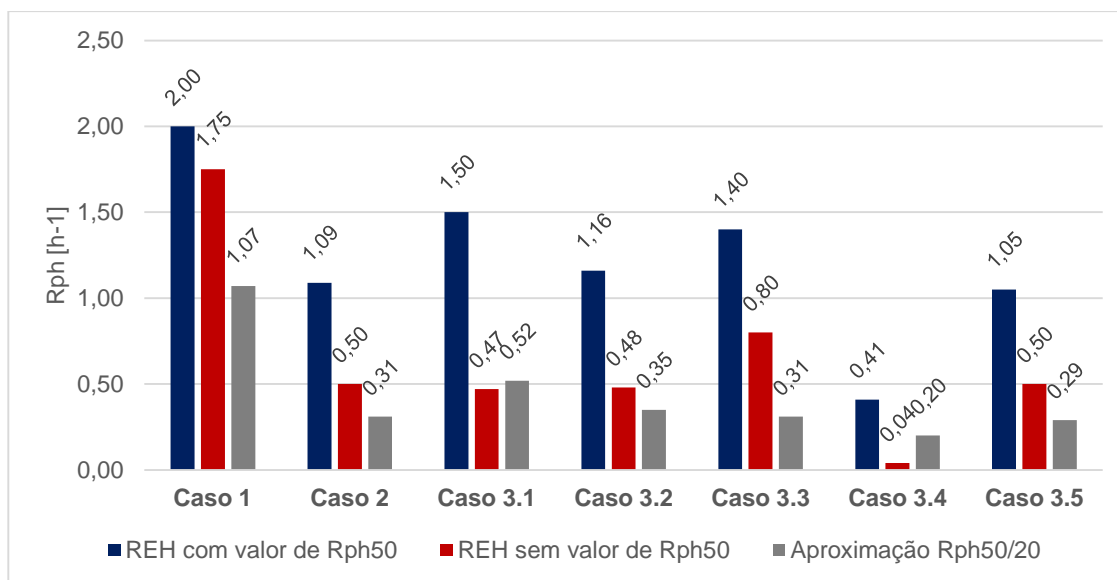


Figura 4.14 - Análise comparativa dos valores obtidos de Rph, através das diferentes metodologias.

Comparando os resultados com valor de R_{ph50} e sem valor de R_{ph50} é comum, a todos os casos, o elevado valor que a ferramenta de cálculo apresenta quando é utilizado o valor de R_{ph50} obtido durante os ensaios. As maiores diferenças registadas encontram-se nos casos 3.1, 3.2. e 3.4 em que os valores de R_{ph} obtidos, com o valor de R_{ph50} , apresentam valores superiores ao dobro dos alcançados sem a inserção deste valor. Só no Caso 1 é que estes dois valores se aproximam. No entanto tal situação pode ser justificada pelo fato de a ferramenta de cálculo apresentar um limite máximo de 2,00 R_{ph} (h^{-1}) nos resultados que pode gerar.

Avaliando agora os valores gerados pela ferramenta com a consideração do valor medido de R_{ph50} e os obtidos pela aproximação, as discrepâncias mais evidentes pertencem ao caso 1 e ao caso 3.3. O caso 1 é provável que apresente esta diferença visto que trata-se de um edifício bastante permeável, o que aumenta a probabilidade de erro. A diferença verificada no caso 3.3 pode ser justificada pelo fato de na ferramenta de cálculo ter sido considerada a existência de uma abertura permanente num determinado ponto da fachada, no entanto, na altura de ensaio, utilizando a porta ventiladora, a tal abertura encontrava-se parcialmente obstruída pelo tubo de extração de gases provenientes do esquentador.

No geral, os valores dos restantes casos calculados pela ferramenta sem a consideração do valor de R_{ph50} e os gerados pela aproximação $R_{ph50}/20$ encontram-se mais próximos que a relação obtida pelos dois grupos de resultados provenientes da folha de cálculo.

Podemos concluir que o aumento do valor de R_{ph} entre o valor obtido pela folha de cálculo sem valor de R_{ph50} e pela aproximação $R_{ph50}/20$ é de aproximadamente 39 %, enquanto que a diferença entre os valores obtidos por ambas as hipóteses disponíveis na folha de cálculo do REH é da ordem dos 44 %.

Foram ainda realizadas simulações que contemplam o descrito pela folha de cálculo na secção “Aberturas de admissão de ar na envolvente” no campo “Área livre das aberturas fixas” onde está descrito que “No caso particular das instalações sanitárias de edifícios existentes sem condutas de evacuação e com janelas exteriores, o efeito da abertura destas janelas na ventilação poderá ser estimado com base numa abertura fixa até 250 cm^2 de área livre por janela”. Desta forma, como os casos de estudo 2 e 3 possuem uma janela em todas as instalações sanitárias sujeitas a ensaio, foi obtido o valor para cada um deles acrescentando uma área de abertura fixa de 250 cm^2 . Os valores obtidos podem ser consultados na Figura 4.15.

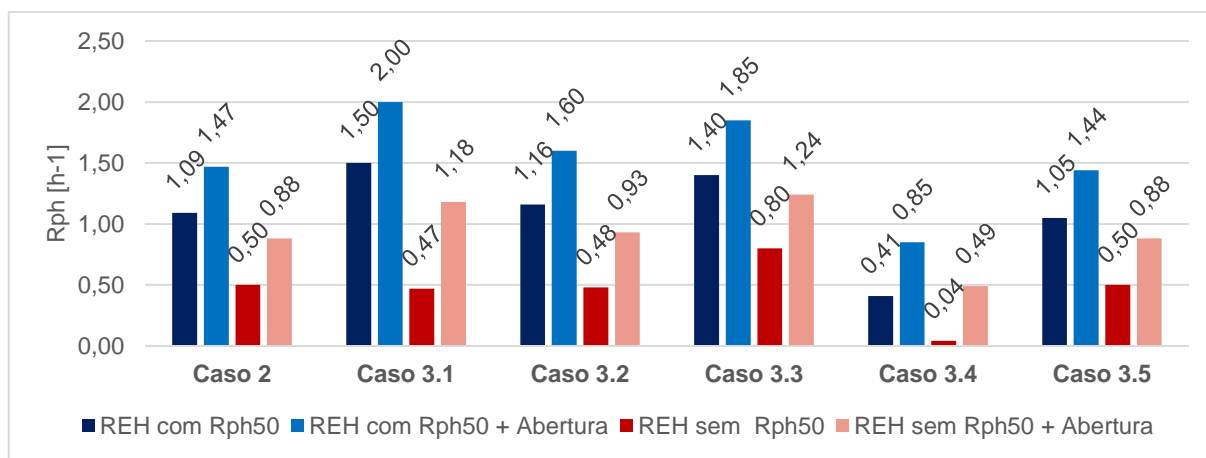


Figura 4.15 - Análise comparativa dos valores obtidos de R_{ph} , com consideração da área de abertura sugerida pela ferramenta de cálculo.

Quando considerada a abertura, o valor de R_{ph} sofre um aumento considerável. Para a gama de amostras representada, esta consideração representa um aumento que pode ir dos 30 até aos 150 %.

No entanto é de salientar a semelhança encontrada entre as colunas onde está incluído o valor de $R_{ph_{50}}$ obtido nos ensaios e as colunas representativas dos resultados sem a consideração do valor de $R_{ph_{50}}$ mas com a consideração da abertura.

Poderá ser concluído que com a consideração da abertura, sugerida pela folha de cálculo, são obtidos valores mais próximos dos reais.

5

ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES

5.1. CASO DE ESTUDO 1

Na dissertação aqui desenvolvida é tido como objetivo, neste capítulo, a caracterização relativa à estanquidade dos componentes construtivos de um edifício “móvel” que servirá para a realização de reuniões, atividades escolares, entre outros, é assim um edifício “multifunções” que pode ser equiparado a uma sala de aula.

Os ensaios, para proceder à respetiva avaliação, foram realizados em despressurização, recorrendo à selagem sucessiva de vários desses componentes. Foi assim avaliada a permeabilidade em condições normais de funcionamento e posteriormente avaliada a contribuição de cada um dos componentes.

5.1.1. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Todos os ensaios realizados estão de acordo com a norma ISO 9972:2012 e com o descrito no capítulo 3 da presente dissertação. Por forma a estimar a permeabilidade dos diferentes elementos procedeu-se à completa selagem da divisão, sendo retiradas sucessivamente as selagens realizadas. Nos ensaios foram aplicadas diferenças de pressão sucessivas e constantes, variando entre 10 e 50 Pa. Desta forma é possível estimar o impacto criado por cada componente.

No âmbito do presente trabalho pretende-se obter valores que permitam avaliar o grau de permeabilidade:

- Do edifício nas suas condições de funcionamento naturais;
- Das caixilharias utilizadas, avaliando-as separadamente relativamente à moldura e à abertura da janela;
- Das aberturas existentes no pavimento, devido à presença de pilares que se prolongam do teto até à base da estrutura;
- Dos painéis constituintes das paredes;
- Do cumeeiro com aberturas para ventilação.

Para proceder a uma correta avaliação dos componentes mencionados foram realizados os seguintes ensaios de depressurização, estando indicado no Quadro 5.1 quais os elementos selados e não selados respetivamente.

Quadro 5.1 - Listagem dos elementos construtivos e opções tomadas quanto à selagem para avaliação da permeabilidade por ensaio.

Ensaio	Pavimento	Janelas [Moldura]	Janelas [Abertura]	Cume Ventilado
1	S	S	S	S
2	NS	S	S	S
3	NS	NS	S	S
4	NS	NS	NS	S
5	NS	NS	NS	NS

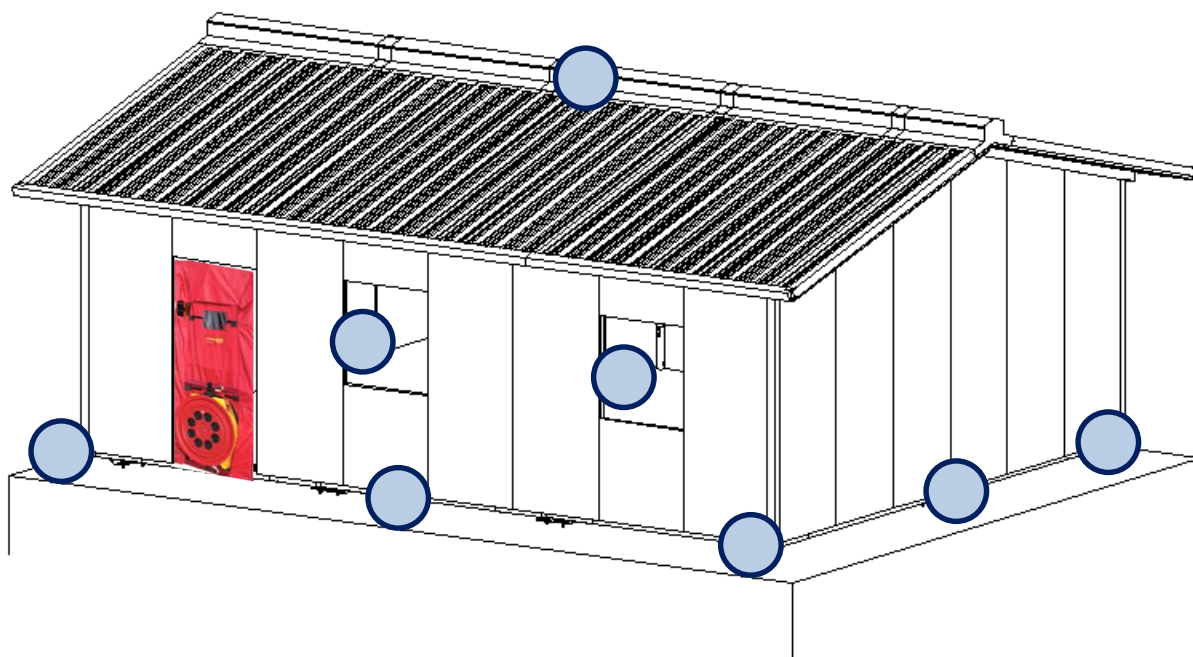
Legenda: **NS**: Não selado, **S**: Selado

Na Figura 5.1, apresenta-se um esquema do edifício estudado, com a indicação da localização da fita isolante aplicada.

O ensaio 5 permitiu determinar diretamente qual o valor de R_{ph50} (h^{-1}) do edifício em condições normais de funcionamento, ou seja, neste ensaio nenhum elemento se encontra selado. Por outro lado, o ensaio 1, permite-nos obter diretamente os valores das infiltrações de ar provocados pela resultante estrutura que não foi selada. Em pormenor o primeiro ensaio contabilizou as perdas pela estrutura do edifício visto que todos os componentes se encontravam devidamente selados.

Os ensaios que se seguiram foram realizados com o objetivo de avaliar a contribuição de cada elemento para as trocas de ar registadas, tendo sido retiradas sucessivamente as selagens previamente realizadas. No ensaio 2 foram retiradas as selagens do pavimento impossibilitando a passagem de ar pelas aberturas existentes devido à penetração dos pilares no pavimento. Desta forma foi possível avaliar a contribuição deste elemento nas trocas de ar. No ensaio 3 foram retiradas as selagens nas caixilharias das janelas, no ensaio 4 foram retiradas as selagens das juntas amovíveis das janelas, no 5 eliminaram-se as selagens no cume ventilado.

Com a estrutura sem qualquer selagem foi possível proceder à contabilização das trocas de ar em condições normais de funcionamento. Após a obtenção do valor de R_{ph50} (h^{-1}) é possível realizar a extrapolação do valor de $R_{ph_{natural}}$ (h^{-1}).



Legenda:  : Selagem aplicada

Figura 5.1 - Localização das selagens realizadas no edifício nos diversos ensaios.

Nas Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 pode-se observar a metodologia adotada no que respeita à selagem dos diversos elementos constituintes deste edifício.

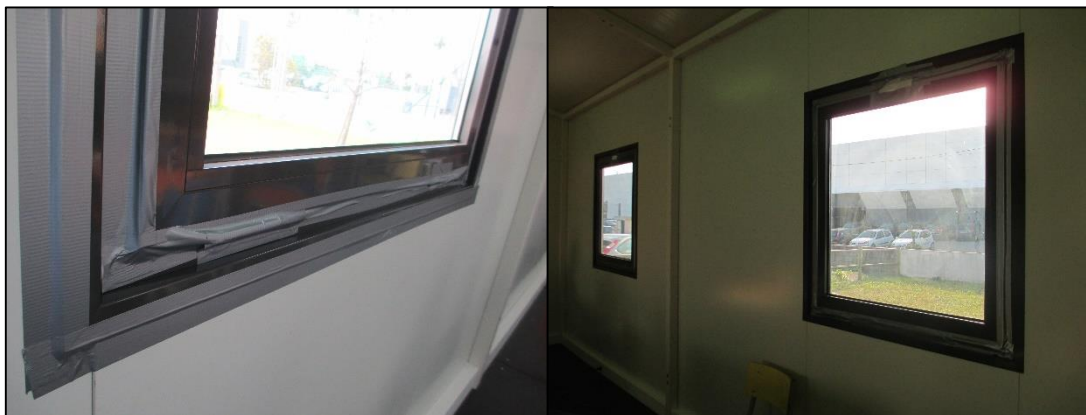


Figura 5.2 - Selagem aplicada nas janelas no contorno da abertura e da moldura.



Figura 5.3 - Selagem aplicada no pavimento na interceção entre pilar e pavimento.



Figura 5.4 - Selagem aplicada ao longo da estrutura do cume ventilado.

Os resultados dos ensaios são tratados de forma automática através do *software Fantestic*. Este programa gera um relatório que apresenta os dados inicialmente inseridos, com as diversas características do edifício e da sua envolvente, e os respetivos resultados do ensaio.

A primeira parte do relatório apresenta os diversos detalhes do edifício em teste, listados na Figura 5.5.

Building Details

Building Address:	Elevation:	25 m
Customer Info:	Height above ground:	3,3 m
	Building Volume, V:	149,3 m³
	Total envelope area, A _{T BAT}	178,3 m²
	Floor Area, A _F	47,9 m²
Test technician:	Building exposure to wind:	Edifício parcialmente protegido
Test company: Faculdade Engenharia Universidade do Porto	Accuracy of measurements:	10%

Figura 5.5 - Relatório gerado com detalhes do edifício (condições de funcionamento).

Seguem-se os valores registados relativos aos diferenciais de pressão inicial e final (Pa), à pressão provocada pelo ventilador da porta (Pa), à listagem da gama de anéis utilizados e ao fluxo total gerado pela porta (m^3/h) e seus valores corrigidos de acordo com as condições climáticas.

De grande importância neste relatório são os gráficos gerados pelo programa que traduzem o número de leituras relativas às pressões induzidas pela porta, Figura 5.6, assim como o gráfico bi-logarítmico com os valores de caudal registado de acordo com as pressões induzidas, Figura 5.7.

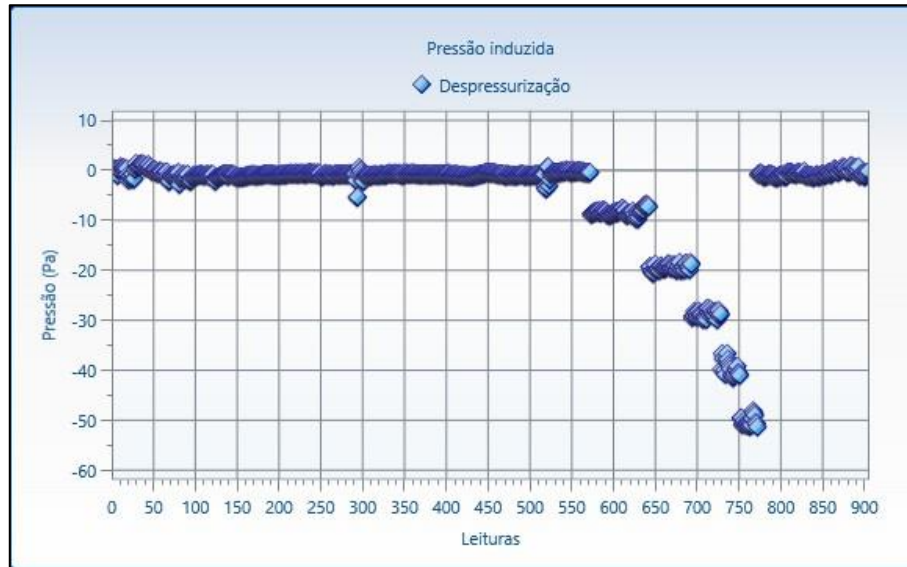


Figura 5.6 - Gráfico representativo do número de leituras relativamente às diversas pressões induzidas (condições de funcionamento).

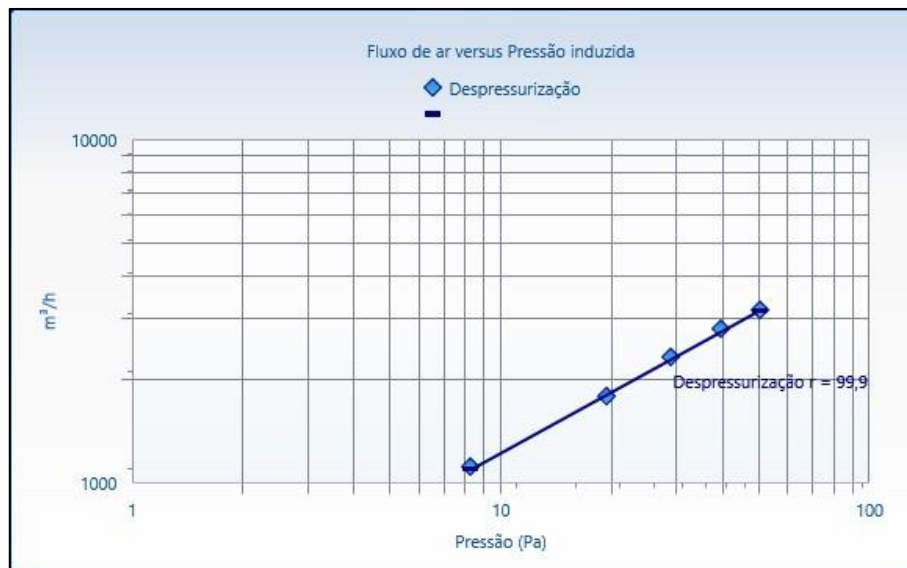


Figura 5.7 - Gráfico bi-logarítmico com representação dos valores de caudal em função das diversas pressões induzidas (condições de funcionamento).

No final do documento, são apresentados os vários parâmetros caracterizadores da permeabilidade ao ar do edifício. São obtidos os valores de r (este valor não deverá ser inferior a 96 % para validação do ensaio), valor do coeficiente de escoamento de ar (C_{env}), do coeficiente de infiltração de ar (C_L), do expoente de escoamento (n), do caudal de ar infiltrado pela envolvente (Q), das renovações por hora a 50 Pa (Rph_{50}), da razão entre o caudal escoado e a área da envolvente (q_{50}) e da razão entre o caudal de ar escoado e a área útil (w_{50}).

O relatório é apresentado de acordo com a Figura 5.8.

Despressurização Test Results

	Results				Results	95% confidence		Uncertainty
<i>Correlation, r [%]</i>	99,94	95% confidence limits		<i>Air flow at 50 Pa, V_{50} [m^3/h]</i>	3180	3060	3295	+/-3,5%
<i>Intercept, C_{env} [$m^3/h.Pa^n$]</i>	314,5	278,5	355,5	<i>Air changes at 50 Pa, n_{50} [/h]</i>	21,30	19,05	23,55	+/-10,6%
<i>Intercept, C_L [$m^3/h.Pa^n$]</i>	315,70	279,5	356,5	<i>Permeability at 50 Pa, q_{50} [$m^3/h.m^2$]</i>	17,840	15,948	19,732	+/-10,6%
<i>Slope, n</i>	0,5905	0,5532	0,6277	<i>Specific Leakage at 50 Pa, w_{50} [$m^3/h.m^2$]</i>	66,419	59,377	73,462	+/-10,6%

Figura 5.8 - Resultados do ensaio apresentado no relatório (condições normais de funcionamento).

Foram gerados relatórios semelhantes para todos os ensaios mencionados no Quadro 5.1.

5.1.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS

No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados obtidos através dos ensaios de despressurização realizados. Neste quadro são apresentados os valores relativos ao caudal de ar infiltrado (Q_{50}), das renovações por hora (Rph_{50}), a razão entre o caudal escoado e a área da envolvente (q_{50}) e a razão entre o caudal de ar escoado e a área útil (w_{50}), todos para uma diferença de pressão de 50 Pa, são ainda apresentados o coeficiente de escoamento de ar (C_{env}), o coeficiente de infiltração de ar (C_L), o expoente de escoamento (n) e o coeficiente de correlação (r). Inclui-se ainda uma estimativa do valor natural das renovações por hora, utilizando para isso a simplificação mencionada em 2.4.2.

Quadro 5.2 - Listagem dos resultados obtidos através dos ensaios de despressurização.

Parâmetros	Ensaio				
	1	2	3	4	5
Q_{50} [m ³ /h]	1170	1195	1285	1295	3180
\pm [%]	5,0	4,4	3,6	4,8	3,5
Rph_{50} [h ⁻¹]	7,85	8,01	8,60	8,69	21,30
Rph_{nat} [h ⁻¹]	0,39	0,40	0,43	0,43	1,07
q_{50} [m ³ /h.m ²]	6,58	6,71	7,20	7,28	17,84
w_{50} [m ³ /h.m ²]	24,48	24,98	26,80	27,09	66,42
C_{env} [m ³ /h.Pa ⁿ]	90,81	126,50	109,50	87,60	314,50
C_L [m ³ /h.Pa ⁿ]	90,81	126,07	108,70	87,61	315,70
n	0,65	0,58	0,63	0,79	0,60
r [%]	99,88	99,89	99,94	99,92	99,94

No Quadro 5.3 é feita uma síntese dos principais valores dos ensaios realizados, permitindo ter uma visão mais objetiva dos resultados obtidos facilitando a comparação entre os ensaios.

São apresentados para cada um dos ensaios o valor relativo às renovações por hora e também da lei da potência, que relaciona a variação de caudal relativamente à pressão induzida. Apresenta-se também o valor do parâmetro r que demonstra a validade de todos os ensaios.

Quadro 5.3 - Síntese dos parâmetros principais obtidos nos ensaios de despressurização.

Parâmetros	1	2	3	4	5
Rph₅₀ [h⁻¹]	7,85	8,01	8,60	8,69	21,30
$Q = c(\Delta p)^n$	$Q = 90,8(\Delta p)^{0,65}$	$Q = 126,1(\Delta p)^{0,58}$	$Q = 108,7(\Delta p)^{0,63}$	$Q = 87,61(\Delta p)^{0,79}$	$Q = 315,7(\Delta p)^{0,60}$
r [%]	99,88	99,89	99,94	99,92	99,94

5.1.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO EM CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO NORMAIS

No Quadro 5.2 é possível constatar que o valor de Rph₅₀ para este edifício encontra-se bastante elevado, Rph_{50, despressurização} = 21,30 h⁻¹. Aplicando a aproximação para a determinação do valor de Rph_{nat} obtém-se cerca de 1,07 h⁻¹, o que de acordo com os estudos realizados por Liddament e Wilson (1991) e o estipulado pela norma EN ISO 13790:2004 (valores de RPH₅₀ ≥ 10 h⁻¹ permeabilidade elevada), classificam este edifício como bastante permeável. Este facto trará, obviamente, consequências importantes relativamente à eficiência energética do edifício. Comparando ainda o coeficiente de escoamento dos ensaios em condições de funcionamento ($c = 315,70$) com os restantes (em média três vezes inferiores) é perceptível o impacto que se irá verificar nos valores do volume do caudal de ventilação provocado pelas aberturas existentes.

Relativamente ao parâmetro q₅₀ que estabelece a relação entre o caudal escoado, com uma pressão a 50 Pa, e a área da envolvente, podemos também afirmar que este valor se encontra muito para além do expectável, numa análise mais pormenorizada e comparando-o com os valores tabelados para este tipo de edifício (escolas; escritórios; salas de reunião), (Quadro 2.9) o valor recomendado é de q₅₀ = 3 m³/ (h.m²) enquanto que o valor máximo aceitável é de 9 m³/ (h.m²). No ensaio cinco o resultado apresentado para este indicador apresenta o dobro do valor considerado aceitável (q₅₀ ≈ 18 m³/ (h.m²)).

5.1.4. CURVA CARACTERÍSTICA DOS COMPONENTES

No Quadro 5.4 encontram-se discriminadas as equações que traduzem a relação entre os caudais de ventilação e as pressões. A partir desta informação é possível obter curvas caraterísticas da permeabilidade ao ar, Figura 5.9.

Quadro 5.4 - Variação dos caudais de ar de acordo com diversos valores de pressão através das equações de cada ensaio.

		1	2	3	4	5
		Q [m ³ /h]	Q [m ³ /h]	Q [m ³ /h]	Q [m ³ /h]	Q [m ³ /h]
$Q = c(\Delta p)^n$		$90,8(\Delta p)^{0,65}$	$126,1(\Delta p)^{0,58}$	$108,7(\Delta p)^{0,63}$	$87,61(\Delta p)^{0,79}$	$315,7(\Delta p)^{0,60}$
Δp [Pa]	10	405,59	479,42	463,69	540,20	1256,82
	20	636,44	716,66	717,59	934,04	1904,99
	30	828,35	906,66	926,44	1286,71	2429,67

40	998,68	1071,30	1110,52	1615,03	2887,42
50	1154,56	1219,32	1278,15	1926,37	3301,08

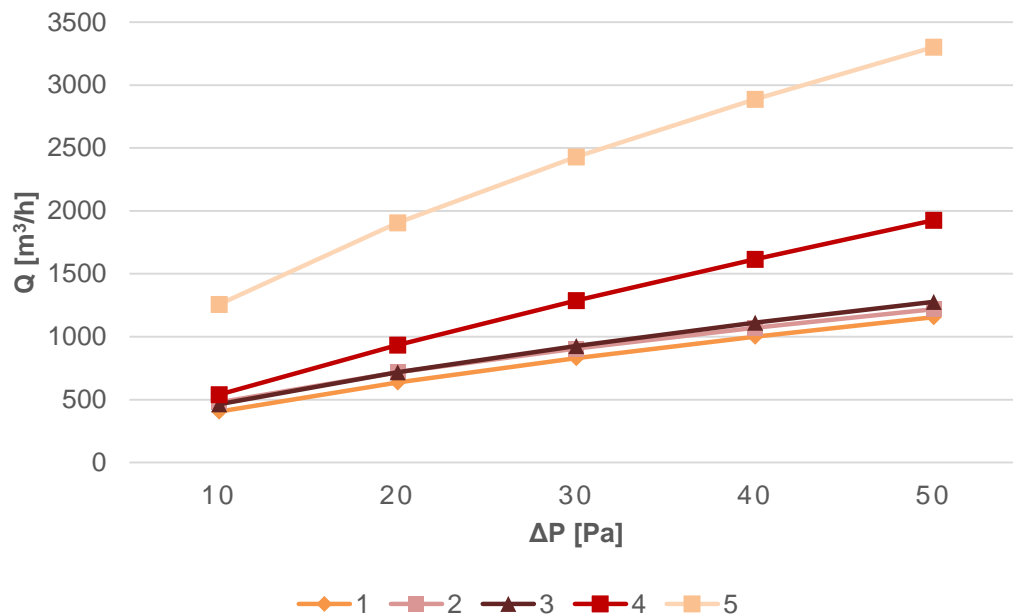


Figura 5.9 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar geradas através dos valores de caudais obtidos nos ensaios.

Por forma a determinar qual ou quais dos elementos construtivos apresenta maior influência no grau de permeabilidade apresentado pelo edifício foram realizadas diversas relações entre os ensaios, sendo assim possível contabilizar qual a exata contribuição de cada um desses elementos.

As equações que traduzem estas relações encontram-se discriminadas em baixo.

$$Q_{estrutura} = Q_1 \quad (5.1)$$

$$Q_{pavimento} = Q_2 - Q_1 \quad (5.2)$$

$$^1Q_{janelas} = Q_4 - Q_2 \quad (5.3)$$

$$Q_{cume} = Q_5 - Q_4 \quad (5.4)$$

¹ Para as janelas foi considerado o efeito conjunto da moldura e da abertura com o objetivo de obter resultados com maior expressão.

Utilizando as equações acima discriminadas foram obtidos os valores dos caudais para cada uma das pressões (10, 20, 30, 40 e 50 Pa) cuja representação gráfica corresponde à curva de cada um dos elementos construtivos.

Posteriormente foi possível determinar a equação que melhor se ajusta à distribuição dos dados através de uma regressão potencial. A partir destas equações foi então possível prever resultados além daqueles que foram utilizados para obter os parâmetros da regressão. Mais uma vez tenta-se que o trabalho aqui apresentado permita a fácil reprodutibilidade de resultados, possibilitando a comparação com outros estudos.

Através desta metodologia foi possível obter os respectivos coeficientes e expoentes de escoamento de cada um dos elementos, estando disponíveis para consulta no Quadro 5.5 - Equações de permeabilidade ao ar dos elementos construtivos.

As equações apresentadas permitem quantificar, quanto à permeabilidade ao ar, os diversos elementos sujeitos a ensaio. É assim representado a quantidade de caudal admitido através de possíveis juntas, aberturas ou fendas que possam existir, encontrando-se a sua representação gráfica na Figura 5.10.

Quadro 5.5 - Equações de permeabilidade ao ar dos elementos construtivos.

	Q Janelas [m³/h]	Q Pavimento [m³/h]	Q Cume Ventilado [m³/h]	Q estrutura [m³/h]
Δp [Pa]	10	60,78	73,83	716,62
	20	217,38	80,22	970,95
	30	380,05	78,31	1142,96
	40	543,73	72,62	1272,39
	50	707,05	64,76	1374,71
Q = c(Δp)ⁿ	2,00(Δp)^{1,52}	91,37(Δp)^{0,07}	284,01(Δp)^{0,41}	90,80(Δp)^{0,65}

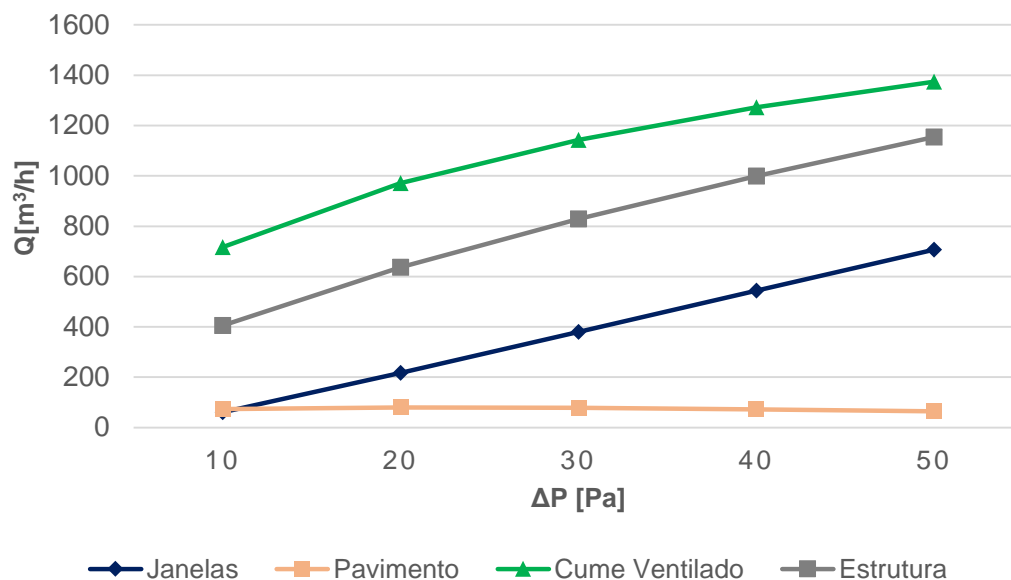


Figura 5.10 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar dos vários elementos da envolvente.

5.1.5. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES

Através do somatório do caudal dos diferentes componentes, às pressões de referência estudadas, foi possível obter, através de uma proporção, o contributo de cada elemento no sistema de ventilação da estrutura.

Os resultados obtidos podem ser consultados no gráfico da Figura 5.11. podendo ser retiradas as seguintes conclusões:

- Cume ventilado: Como seria de esperar a maior percentagem de infiltrações ($\approx 47\%$) ocorre devido ao cume ventilado. Este elemento foi dimensionado precisamente para proporcionar a renovação de ar necessária para uma aceitável QAI. Os valores obtidos, nomeadamente o coeficiente de escoamento ($C = 284,01$), demonstram a elevada influência que este elemento tem nas perdas registadas. Este elemento é o principal responsável pelo elevado valor de $R_{ph_{natural}} (\approx 1,07 \text{ h}^{-1})$ contabilizado em condições de funcionamento.
- Estrutura: As fugas entre o pavimento e as fundações, paredes, teto, tomadas elétricas, entre outras perfurações representam cerca de 34 % do total das infiltrações.
- Janelas: Estes elementos apresentam elevada estanquidade por serem componentes com tecnologia atual e desenvolvida para promover a eficiência energética do edifício. Nesta estrutura são responsáveis por cerca de 16 % das trocas de ar.
- Pavimento: Foi importante proceder à contabilização deste elemento devido à solução construtiva adotada. As aberturas no pavimento provocadas pelos pilares metálicos poderiam representar grande influência nas trocas de ar registadas. No entanto tal não se verificou, este elemento é responsável por aproximadamente 3 % das trocas de ar.

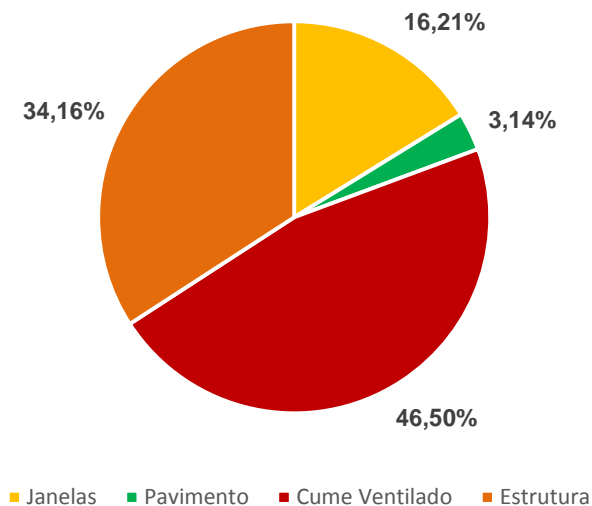


Figura 5.11 - Representação da influência de cada elemento da envolvente na ventilação do edifício.

Foi ainda feita a comparação entre as influências dos vários componentes utilizando os valores obtidos no ensaio de despressurização a 50 Pa com a influência obtida pela média dos ensaios às diferentes pressões (Figura 5.11). Esta comparação pode ser consultada no gráfico da Figura 5.12. Pretende-se perceber qual a influência de um ensaio com pressão induzida a 50 Pa nos diferentes elementos submetidos a ensaio.

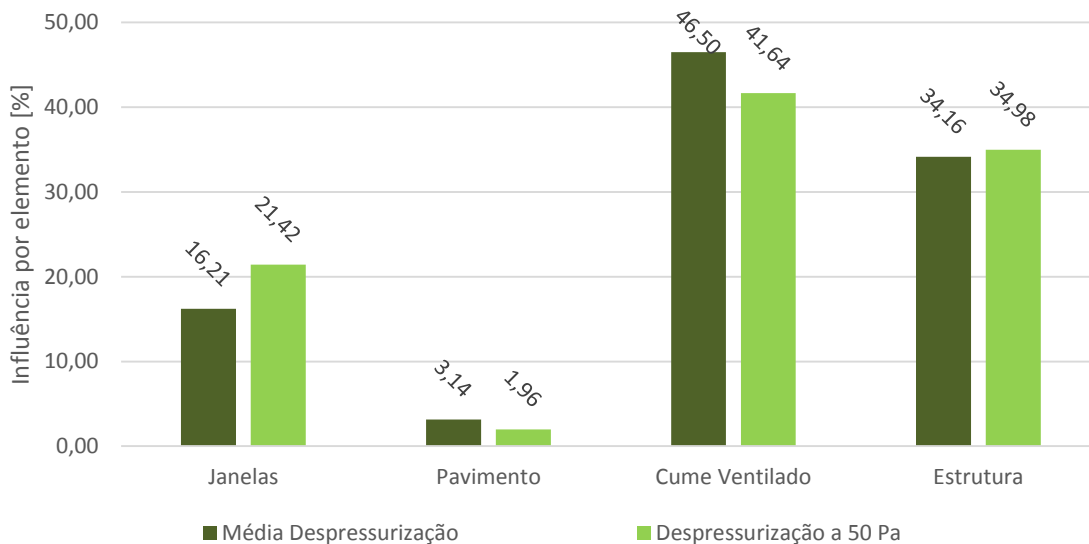


Figura 5.12 - Comparação da influência dos elementos em estudo quando submetidos a um diferencial de pressão de 50 Pa com o resultado da média de todas as pressões.

Estas diferenças tiveram particular expressividade nas janelas. É evidente a influência que o ensaio a 50 Pa tem na quantidade de caudal infiltrado por este elemento. Relativamente à média dos ensaios de despressurização existe um incremento de cerca de 25 %.

5.2. CASO DE ESTUDO 2

Neste caso de estudo será feita a caracterização experimental da permeabilidade ao ar dos diferentes componentes existentes numa habitação típica portuguesa. Este apartamento encontra-se descrito e pormenorizado no ponto 4.2 da presente dissertação.

Em distinção do método utilizado para o caso de estudo número 1, foram realizados ensaios de pressurização para análise dos vários elementos e apenas um ensaio de despressurização para obtenção da taxa de renovação de ar em condições normais de funcionamento.

5.2.1. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Todos os ensaios realizados encontram-se em concordância com o descrito pela norma ISO 9972:2012 e com a descrição realizada no capítulo 3.

Em particular, neste caso, para preparação do espaço foram tomadas as seguintes medidas:

- Seleção da porta principal para colocação do sistema da porta ventiladora;
- O espaço em frente ao sistema foi desimpedido;
- Todas as ligações existentes com o exterior foram fechadas (portas e janelas);
- Selagem das grelhas de extração (casa de banho) e de admissão (sala e quartos);
- Visto que os sifões não continham água foram seladas todas as aberturas a fim de evitar fugas pelas tubagens (bacia de retrete, lavatório, banheira e pia lava-louça);
- Todas as portas interiores foram abertas;
- Selados todos os elementos objeto de estudo cuja listagem se encontra no parágrafo seguinte.

O fogo em estudo foi testado para obter resultados que permitam avaliar qual o contributo dos seguintes componentes na permeabilidade registada em condições normais de funcionamento:

- Porta, janela e postigo existentes na cozinha com ligação à lavandaria, Figura 5.13;
- Tomadas elétricas (três por quarto e sala; duas na cozinha; uma na casa de banho), Figura 5.14;
- Abertura existente na cozinha utilizada para exaustão de fumos e cheiros provenientes da atividade doméstica, Figura 5.15;
- Grelha de extração existente na casa de banho, Figura 5.16;
- Caixilharias e caixas de estore, Figura 5.17;
- Grelhas de admissão posicionadas nas caixas de estore (duas por sala; uma por quarto), Figura 5.18;
- Tubagens provenientes do exterior que percorrem as paredes do apartamento para fornecimento de água.

Todos os elementos em avaliação foram selados utilizando fita adesiva e mantas plásticas.

A selagem da ligação com a lavandaria, assim como as caixilharias e caixas de estore foi realizada utilizando uma manta plástica em volta dos elementos. Optou-se por avaliar as caixilharias e caixas de estore em conjunto devido ao elevado número de juntas e pequenos pormenores que tornariam difícil a sua vedação. Outra particularidade deste apartamento que se mostrou uma condicionante foi o facto de as paredes serem revestidas a tinta areada o que dificultou a aderência da fita adesiva. Por esta razão apenas foram realizados ensaios de pressurização de modo a evitar que o natural movimento de ar provocado pela despressurização do apartamento pudesse provocar a descolagem da fita, impedindo a obtenção de resultados credíveis.

Apenas foi realizado um ensaio de despressurização. O ensaio foi realizado para avaliar o Rph do apartamento em condições naturais de funcionamento.

No primeiro ensaio todos os elementos em avaliação encontravam-se devidamente selados. Foi possível obter o valor das fugas de ar provocadas por fendas que possam existir na estrutura ou até mesmo provocadas pela entrada principal onde estava localizado o sistema de pressurização.

Os ensaios seguintes caracterizaram-se pela eliminação sucessiva das vedações, elemento a elemento. Através do diferencial dos caudais gerados a uma pressão de 50 Pa entre ensaios sucessivos foi possível determinar o caudal correspondente a cada um dos elementos. Este assunto será abordado com maior pormenorização no ponto 5.2.4.



Figura 5.13 - Acesso à lavandaria pela cozinha. Selagem aplicada à porta e postigo.



Figura 5.14 - Selagem aplicada às tomadas elétricas.



Figura 5.15 - Abertura existente na cozinha utilizada para exaustão.

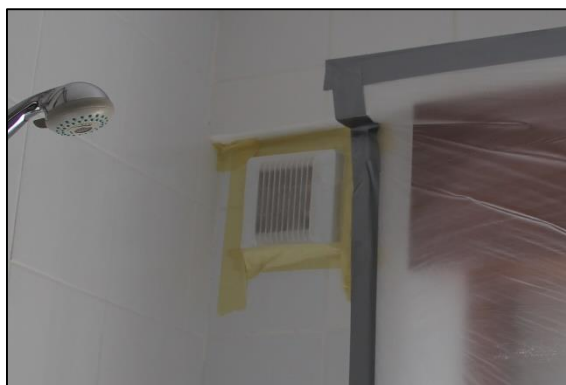


Figura 5.16 - Grelha de extração localizada na casa de banho.



Figura 5.17 - Selagem aplicada às caixilharias e caixas de estore.



Figura 5.18 - Selagem aplicada às grelhas autorreguláveis aplicadas nas caixas de estore.

A listagem dos ensaios realizados e respetiva metodologia adotada relativamente aos elementos selados e não selados encontra-se pormenorizada no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Listagem dos elementos construtivos e opções tomadas quanto à selagem para avaliação de permeabilidade por ensaio.

Ensaio	Cozinha	Tomadas	Exaustor	Grelhas extração	Caixilharias	Grelhas admissão	Tubagens
1	S	S	S	S	S	S	S
2	NS	S	S	S	S	S	S
3	NS	NS	S	S	S	S	S
4	NS	NS	NS	S	S	S	S
5	NS	NS	NS	NS	S	S	S
6	NS	NS	NS	NS	NS	S	S

7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S
8 P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8 D	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Legenda: **NS**: Não selado; **S**: Selado.

Foram gerados ao todo nove relatórios através do *software Fantestic*. Estes relatórios apresentam um conjunto de dados inicialmente inseridos, com as diversas características do edifício e da sua envolvente e os respetivos resultados do ensaio. Um exemplo dos relatórios gerados encontra-se disponível para consulta no Anexo 1.

5.2.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS

No Quadro 5.7 encontram-se os resultados dos ensaios realizados. São descritos os valores relativos ao caudal de ar escoado (Q_{50}), das renovações por hora (Rph_{50}), a razão entre o caudal escoado e a área da envolvente (q_{50}), a razão entre o caudal de ar escoado e a área útil (w_{50}), o valor do coeficiente de escoamento de ar (C_{env}), o coeficiente de infiltração de ar (C_L) o expoente de escoamento (n) e o coeficiente de correlação (r). Para todos os resultados foi utilizado um diferencial de pressão a 50 Pa. Inclui-se também o valor de Rph natural calculado através da estimativa mencionada em 2.4.2.

Quadro 5.7 - Listagem dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.

Parâmetros	1	2	3	4	5	6	7	8	
	P	P	P	P	P	P	P	P	D
Q_{50} [m³/h]	185,00	336,00	356,50	547,00	593,10	872,50	1125,00	1140,00	1135,00
± [%]									
Rph_{50}	0,99	1,82	1,93	2,96	3,21	4,72	6,08	6,17	6,15
[h⁻¹]									
Rph_{nat}	0,05	0,09	0,10	0,15	0,16	0,24	0,30	0,31	0,31
[h⁻¹]									
q_{50}	1,53	2,78	2,95	4,52	4,90	7,21	9,30	9,43	9,40
[m³/h.m²]									
w_{50}	3,93	4,54	4,82	7,40	6,91	11,79	15,20	15,42	15,37
[m³/h.m²]									
C_{env}	79,05	58,70	40,44	28,25	144,50	90,85	149,50	191,50	118,10
[m³/h.Paⁿ]									

C_L [m³/h.Pa ⁿ]	79,57	58,97	40,44	28,29	145,19	91,192	151,05	192,23	119,10
n	0,22	0,45	0,56	0,75	0,36	0,58	0,51	0,46	0,58
r [%]	79,43	99,12	99,57	99,82	97,65	98,97	99,82	99,52	99,89

Legenda: **P**: Pressurização; **D**: Despressurização

Da necessidade da obtenção de um método que possibilite a obtenção de resultados comparáveis foi realizada uma síntese dos principais valores dos ensaios (Quadro 5.8).

Para cada um dos ensaios é apresentado o valor relativo às renovações por hora e também a chamada “*Lei da Potência*”, que estabelece a relação entre a variação de caudal e a pressão induzida. O coeficiente r , importante na validação dos ensaios, também é apresentado.

Quadro 5.8 - Síntese dos parâmetros principais obtidos nos ensaios de pressurização.

Ensaio		Rph₅₀ [h⁻¹]	$Q = c(\Delta p)^n$	r [%]
1	P	0,99	79,05(Δp) ^{0,22}	79,43
2	P	1,82	58,70(Δp) ^{0,45}	99,12
3	P	1,93	40,44(Δp) ^{0,56}	99,57
4	P	2,96	28,25(Δp) ^{0,75}	99,82
5	P	3,21	144,50(Δp) ^{0,36}	97,65
6	P	4,72	90,85(Δp) ^{0,58}	98,97
7	P	6,08	149,50(Δp) ^{0,51}	99,82
8	P	6,17	191,50(Δp) ^{0,46}	99,52
	D	6,15	118,10(Δp) ^{0,58}	99,89

Legenda: **P**: Pressurização; **D**: Despressurização.

5.2.3. ANÁLISE RESULTADOS DOS ENSAIOS

Foi possível obter o valor de Rph₅₀, para condições naturais de funcionamento, através do ensaio número 8. Foram obtidos valores semelhantes para o ensaio de pressurização (Rph₅₀ = 6,17 h⁻¹) e despressurização (Rph₅₀ = 6,15 h⁻¹), o que de acordo com os estudos realizados por Liddament e Wilson (1991) classifica o apartamento como estanque, no entanto o estipulado pela EN ISO 13790:2004 indica que para valores de Rph₅₀ entre 4 e 10 h⁻¹ devem ser classificadas com estanquidade da envolvente média.

Calculando o valor de $R_{ph_{nat}}$, através da aproximação sugerida 2.4.2, esta habitação apresenta 0,31 renovações por hora. A realidade climática portuguesa indica que para que haja equilíbrio entre eficiência energética, qualidade do ar e o risco de condensação serão necessárias entre 0,7 a 0,8 renovações por hora. Por outro lado, pelo atual regulamento do desempenho energético dos edifícios (REH) o valor apresentado pelo apartamento encontra-se bastante próximo do requisito mínimo de ventilação ($R_{ph_{nat,min}} = 0,40 \text{ h}^{-1}$).

Relativamente ao indicador que relaciona o caudal escoado, a uma pressão de 50 Pa, e a área da envolvente (q_{50}) este valor encontra-se um pouco elevado. Comparando-o com os valores tabelados para habitações, disponíveis para consulta no Quadro 2.9, o valor recomendado é de $q_{50} = 3 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ enquanto que valores aceitáveis situam-se entre os 5 e $9 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$.

5.2.4. CURVA CARACTERÍSTICA DOS COMPONENTES

No Quadro 5.9 encontram-se descritas as equações que traduzem a relação entre os caudais de ventilação e pressões utilizadas nos ensaios. A partir desta informação é possível obter curvas de permeabilidade ao ar, disponíveis para consulta na Figura 5.19. Estas curvas demonstram a variação da quantidade de caudal escoado de ensaio para ensaio, que tal como expectável, apresenta um aumento contínuo devido à diminuição dos componentes selados.

Quadro 5.9 - Variação dos caudais de ar de acordo com diversos valores de pressão através das equações de cada ensaio.

Ensaio	$Q = c(\Delta p)^n$	$\Delta p \text{ [Pa]}$				
		10	20	30	40	50
1	$79,05(\Delta p)^{0,22}$	131,19	152,80	167,06	177,97	186,93
2	$58,70(\Delta p)^{0,45}$	165,44	226,00	271,23	308,72	341,33
3	$40,44(\Delta p)^{0,56}$	146,83	216,47	271,64	319,13	361,61
4	$28,25(\Delta p)^{0,75}$	158,86	267,17	362,13	449,33	531,19
5	$144,50(\Delta p)^{0,36}$	331,03	424,85	491,62	545,27	590,88
6	$90,85(\Delta p)^{0,58}$	345,40	516,32	653,21	771,83	878,47
7	$149,50(\Delta p)^{0,51}$	483,77	688,92	847,18	981,05	1099,30
8	P	191,50	759,70	915,47	1045,00	1157,96
	D	118,10	671,19	849,14	1003,33	1141,96

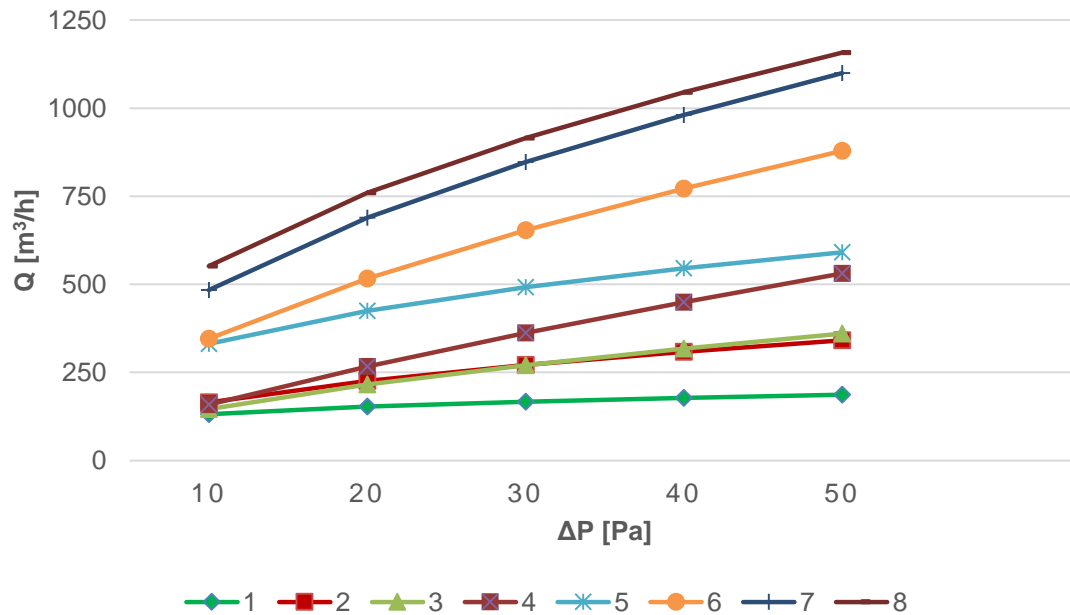


Figura 5.19 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar geradas através dos valores de caudais obtidos nos ensaios de pressurização.

Para determinação de quais os elementos construtivos com maior influência na permeabilidade do fogo em estudo foi estabelecida uma relação entre os ensaios, tornando possível a determinação do caudal de cada componente em estudo.

Através do diferencial entre ensaios sucessivos foi possível obter equações que permitem o cálculo do caudal por elemento. As equações são as seguintes:

$$Q_{estrutura} = Q_1 \quad (5.5)$$

$$Q_{Cozinha} = Q_2 - Q_1 \quad (5.6)$$

$$Q_{Tomadas} = Q_3 - Q_2 \quad (5.7)$$

$$Q_{Exaustor} = Q_4 - Q_3 \quad (5.8)$$

$$Q_{Grelhas\ Extração} = Q_5 - Q_4 \quad (5.9)$$

$$Q_{Caixilharias} = Q_6 - Q_5 \quad (5.10)$$

$$Q_{Grelhas\ Admissão} = Q_7 - Q_6 \quad (5.11)$$

$$Q_{Tubagens} = Q_8 - Q_7 \quad (5.12)$$

Utilizando as equações acima discriminadas foram obtidos os valores dos caudais para as pressões de 10, 20, 30, 40 e 50 Pa.

Através da representação da curva de cada um dos componentes foi possível achar a equação que melhor representa a distribuição dos dados obtidos. Para que fosse possível a obtenção de uma equação em que pudesse ser determinado o valor do caudal para uma qualquer pressão foi utilizada uma regressão potencial. A partir da equação apresentada é então possível, prever resultados além daqueles que foram utilizados para obter os parâmetros da regressão. Mais uma vez tenta-se que o trabalho apresentado permita a fácil reprodutibilidade de resultados, possibilitando a comparação com outros estudos.

Foi possível obter os respetivos coeficientes e expoentes de escoamento de cada um dos elementos, estando disponíveis para consulta no Quadro 5.10.

As equações apresentadas permitem quantificar, quanto à permeabilidade ao ar, os diversos elementos sujeitos a ensaio. É assim representada a quantidade de caudal admitido para as pressões de 10, 20, 30, 40 e 50 Pa, por elemento, encontrando-se a sua representação gráfica na Figura 5.20.

Quadro 5.10 - Equações de permeabilidade ao ar dos elementos construtivos.

Ensaio	Δp [Pa]					$Q = c(\Delta p)^n$
	10	20	30	40	50	
Estrutura	131,19	152,8	167,06	177,97	186,93	$79,05(\Delta p)^{0,22}$
Cozinha	34,25	73,2	104,17	130,75	154,4	$4,16(\Delta p)^{0,94}$
2Tomadas	-18,61	-9,53	0,40	10,41	20,28	$0,0002(\Delta p)^{2,99}$
Exaustor	12,03	50,7	90,5	130,20	169,58	$0,31(\Delta p)^{1,64}$
Grelhas Extração	172,17	157,68	129,49	95,94	59,69	$795,52(\Delta p)^{-0,60}$
Caixilharias	14,37	91,47	161,59	226,56	287,59	$0,26(\Delta p)^{1,85}$
Grelhas Admissão	138,37	172,6	193,97	209,22	220,83	$71,30(\Delta p)^{0,30}$
Tubagens	68,52	70,78	68,29	63,95	58,66	$87,40(\Delta p)^{-0,087}$

² Para obtenção da equação deste elemento foram apenas considerados os valores obtidos para as pressões de 30, 40 e 50 Pa, visto que a baixas pressões (10 e 20 Pa) não é possível a obtenção de valores realistas passíveis de serem avaliados.

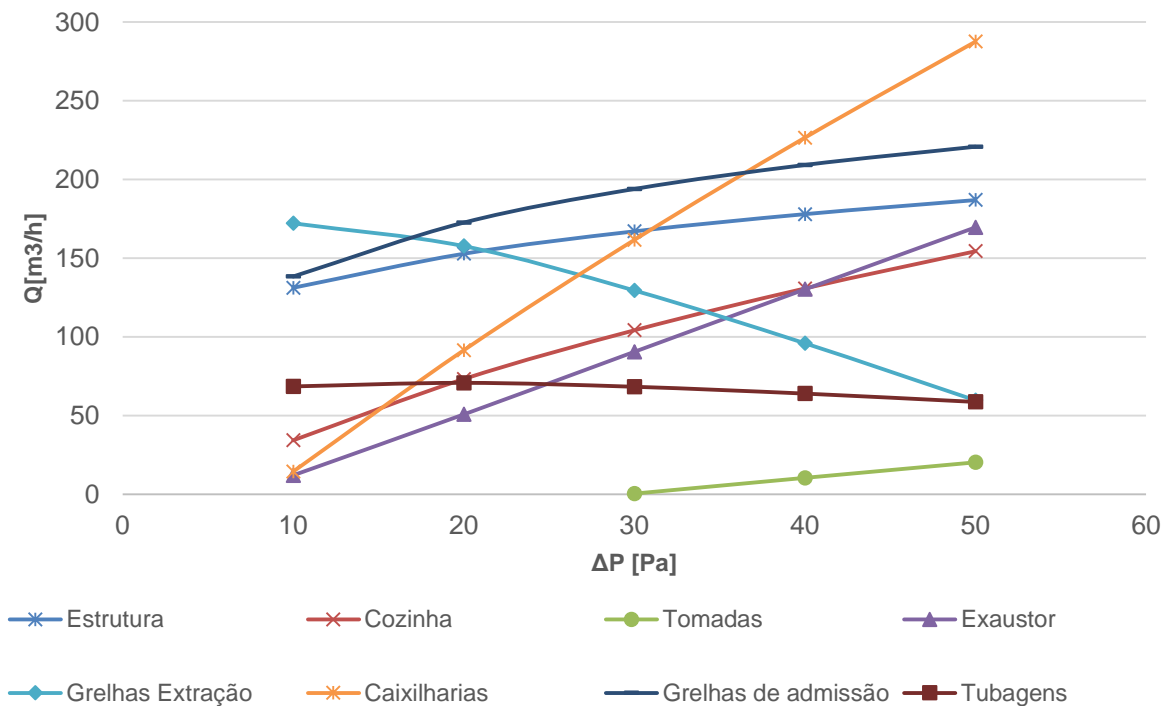


Figura 5.20 - Representação das curvas características de permeabilidade ao ar dos vários elementos da envolvente, resultante dos ensaios.

5.2.5. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES

Foi possível obter o contributo de cada elemento no sistema de ventilação da estrutura (Figura 5.21), através de uma proporção com o valor total das infiltrações registadas e o somatório do caudal dos diferentes componentes às pressões de referência.

Retiraram-se as seguintes conclusões:

- Grelhas de admissão: Surpreendentemente este foi o elemento que apresentou maior influência na permeabilidade da envolvente (21 %). As grelhas em questão sendo de admissão de ar autorreguláveis e os ensaios de pressurização, seria expectável que o valor de caudal provocado por este elemento fosse reduzido. Podemos concluir que em ambiente de ensaio, onde são sujeitas a elevadas pressões, estes elementos deixam de desempenhar a função para o qual foram dimensionados.
- Estrutura: As trocas de ar provocadas por fugas através das ligações entre pavimento e elementos sanitários, rodapés, perfurações para iluminação e tubagens, e até por fugas através da caixilharia do sistema da porta ventiladora representam 18 % de influência na permeabilidade da envolvente.
- Caixilharias e caixas de estore: Estes elementos são responsáveis por aproximadamente 18 % das fugas registadas. Tal como expectável este é um dos componentes com maior contribuição para a permeabilidade global do fogo muito devido à sua configuração e até aplicação.

- Grelhas de extração: Com o aumento da pressão induzida, este elemento apresentou uma diminuição constante na quantidade de caudal extraído. O facto da ventoinha se encontrar destravada aquando da realização dos ensaios pode ter adulterado, de alguma forma, os resultados obtidos. O comportamento deste elemento está bem visível na Figura 5.20, onde está representada a curva que traduz o seu comportamento com o incremento da pressão.
- Cozinha: A porta e escotilha que fazem a ligação através da cozinha à lavandaria são responsáveis por cerca de 11 % das perdas registadas. A configuração da junta horizontal inferior poderá ter sido o principal responsável pelo valor obtido. Face aos requisitos da NP 1037-1, este é um dos elementos que deverá merecer mais atenção na fase de projeto e execução.
- Exaustor: A abertura existente na cozinha é responsável por aproximadamente 10 % das perdas registadas.
- Tubagens: As aberturas na parede para as tubagens provenientes do exterior têm uma influência de cerca de 7 %. Visto ser uma situação facilmente contornável, aconselha-se o preenchimento deste espaço com algum tipo de preenchimento.
- As tomadas mostraram que não são elementos preocupantes para a contabilização das trocas de ar.

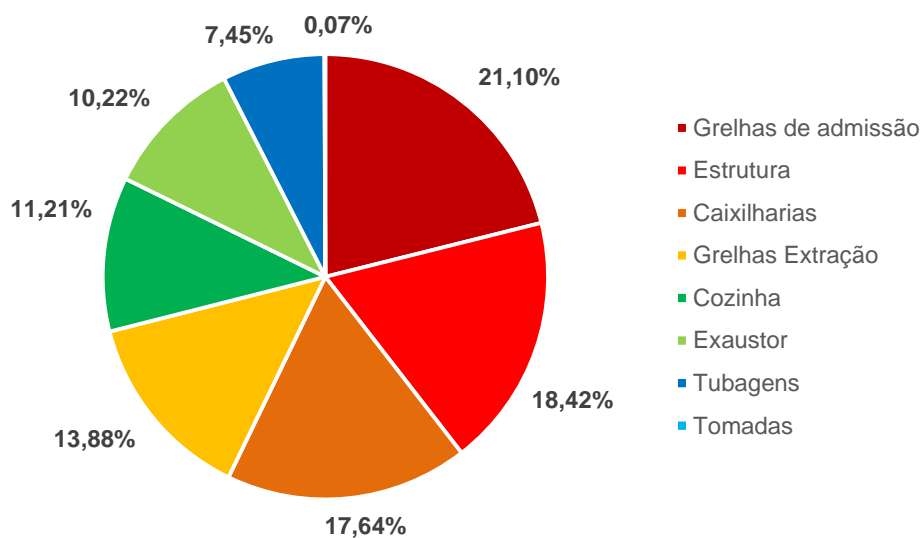


Figura 5.21 - Representação da influência de cada elemento da envolvente na ventilação do edifício.

Mais uma vez, no presente caso de estudo, foi obtida a comparação entre a influência dos vários componentes para os resultados obtidos através do ensaio de pressurização a 50 Pa com a média dos ensaios às pressões de 10, 20, 30, 40 e 50 Pa. Esta comparação pode ser consultada no gráfico da Figura 5.22.

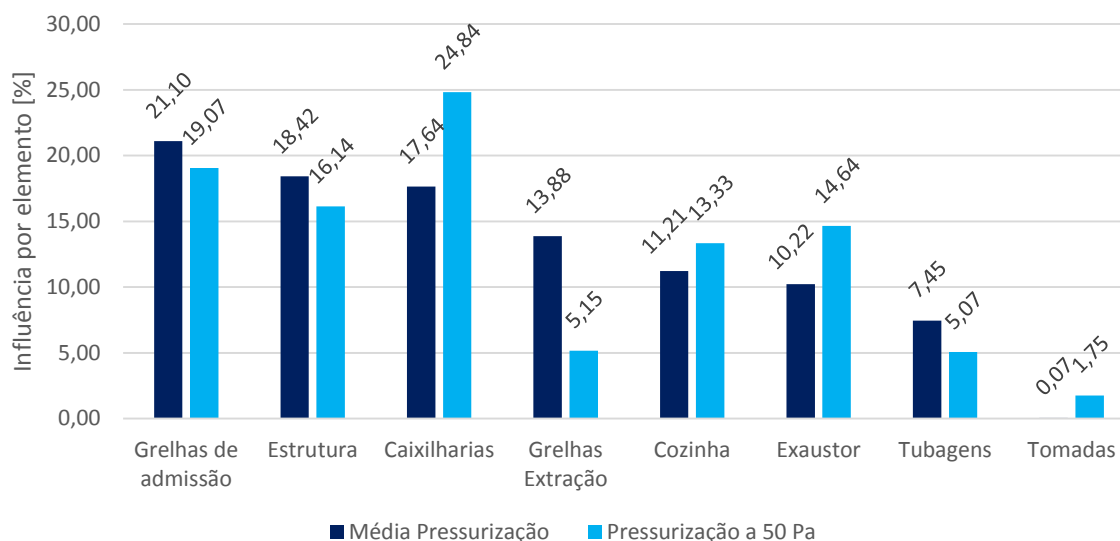


Figura 5.22 - Comparação da influência de cada elemento da envolvente, na ventilação do edifício, quando submetido a um diferencial de pressão de 50 Pa com o resultado da média de todas as pressões.

Estas diferenças representaram maior influência nos seguintes elementos:

- **Caixilharias:** A contabilização apenas do ensaio à pressão de referência 50 Pa identifica este elemento como o mais influente na permeabilidade da envolvente. É notória a expressividade dos resultados obtidos por este componente que regista um aumento de aproximadamente 29 %.
- **Grelhas de extração:** A diferença apresentada por este elemento veio reafirmar o anteriormente discutido.
- **Tomadas:** Devido à baixa permeabilidade demonstrada anteriormente por este elemento era expectável (tal como demonstrado) que a elevadas pressões a sua influência fosse evidenciada.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

O trabalho desenvolvido permitiu aprofundar o conhecimento sobre o grau de estanquidade em diversos elementos construtivos, assim como nas habitações estudadas nos vários casos de estudo.

No entanto, está patente a grande ambiguidade que pode surgir na interpretação da legislação nas considerações a tomar durante a realização dos ensaios para avaliação do Rph global da habitação, nomeadamente:

- Quais os elementos a selar temporariamente;
- Medição da área da envolvente;
- Contabilização de volumes.

Relativamente à avaliação dos diversos elementos construtivos, a norma deverá desenvolver uma metodologia específica para obtenção dos níveis de permeabilidade destes elementos.

Especificamente neste trabalho o objetivo principal das campanhas experimentais foi a avaliação da permeabilidade ao ar de elementos construtivos, procedendo à obtenção de valores que permitam tirar ilações relativamente à sua influência nos valores globais de estanquidade registados nas habitações.

No que diz respeito à caracterização global das habitações, pode ser concluído o seguinte:

- No caso de estudo 1 o valor de R_{ph50} registado é bastante elevado ($R_{ph50, despressurização} = 21,30 \text{ h}^{-1}$), o que em condições naturais aponta para um $R_{ph} = 1,07 \text{ h}^{-1}$.
- No caso de estudo 2 foram também obtidos valores semelhantes para o ensaio de pressurização ($R_{ph50} = 6,17 \text{ h}^{-1}$) e despressurização ($R_{ph50} = 6,15 \text{ h}^{-1}$). O valor médio de R_{ph} é semelhante ao apresentado em bibliografia portuguesa.
- No caso de estudo 3 é evidente que dependendo das alterações realizadas pelos moradores o valor de R_{ph} varia consideravelmente. As habitações que mantiveram a solução de projeto, não sofrendo qualquer alteração, apresentam um valor de R_{ph} superior.

No que diz respeito à caracterização individual dos componentes, para o caso 1, concluiu-se o seguinte:

- O elemento com maior influência na permeabilidade da envolvente é o cumee ventilado tendo registado a maior percentagem de infiltrações (aproximadamente 47 %);

- As fugas registadas através do pavimento, teto, tomadas elétricas, entre outras aberturas não controladas registaram valores na ordem dos 34 %
- As janelas, apesar de serem elementos que apresentam tecnologia recente, são responsáveis por cerca de 16 % das trocas de ar;
- As aberturas existentes entre o pavimento e os pilares são responsáveis por cerca de 3 % das fugas.

Na caracterização individual dos componentes, para o caso 2, retiraram-se as seguintes conclusões:

- As grelhas de admissão demonstraram ser o elemento com maior influência nas fugas registadas (21 %). O seu elevado valor poderá ser justificado pelo facto de que em ambiente de ensaio, onde estão sujeitas a elevadas pressões, estes elementos deixam de desempenhar a função para o qual foram dimensionados.
- As trocas de ar provocadas por fugas pelo pavimento, elementos sanitários, rodapés, perfurações para iluminação e tubagens têm uma influência de 18 %.
- As caixilharias e caixas de estore são responsáveis por aproximadamente 18 % das fugas registadas. Os materiais utilizados para a sua conceção e até a metodologia de aplicação podem estar na origem dos valores obtidos.

Quanto à avaliação do valor de R_{ph} calculado através da folha de cálculo do REH, o resultado obtido quando introduzido o valor de R_{ph50} gerado pelos ensaios através da porta ventiladora, foi sempre superior aos resultados obtidos sem a sua consideração, Figura 4.14. Este facto pode significar que este regulamento se baseia em ensaios realizados em laboratório, não contabilizando assim a qualidade da mão-de-obra (muitas vezes a grande responsável pelo mau desempenho dos elementos). Os motivos apontados poderão significar a necessidade de uma revisão do regulamento para obtenção de valores de R_{ph} mais coerentes com os reais.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como resultado da campanha experimental realizada foi possível a caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente e de elementos constituintes dos edifícios submetidos a ensaio, no entanto devido à escassez de estudos de carácter similar, será necessária a realização de mais estudos por forma a criar uma base de dados com os principais parâmetros caracterizadores da permeabilidade ao ar, para uma variada gama de elementos constituintes da envolvente.

Deverá ser realizada uma vasta campanha experimental, utilizando uma metodologia de ensaio semelhante, de modo a obter resultados comparáveis e credíveis. Estes estudos deverão permitir fazer um levantamento do edificado nacional, caracterizado pela sua variabilidade em soluções tecnológicas.

A nível internacional, apesar dos esforços desenvolvidos para criação de condições que promovam a estanquidade dos edifícios, poucos países possuem critérios incluídos na legislação que definam requisitos de estanquidade para edifícios novos ou existentes. Os países que possuem regulamentação nesta matéria apresentam por vezes semelhanças nos níveis de estanquidade recomendados. A grande diferença reside nas metodologias de ensaio e nos parâmetros obtidos, visto que estes dependem de volumes e áreas cuja forma de obtenção não se encontra normalizada. Perante o que foi referido, recomenda-se que:

- Sejam incluídos requisitos de estanquidade nos códigos de construção;

- Seja incluído pelo menos uma especificação que exija a medição da estanquidade do edifício ainda durante a fase de construção, com o objetivo de encontrar e corrigir possíveis fontes de infiltrações ainda numa fase preliminar da construção;
- Requisitos específicos para a obtenção de valores necessários para a realização dos ensaios;
- Definição de uma metodologia de ensaio única para determinado objetivo;
- Criação de um requisito para medição da estanquidade da envolvente do edifício após a fase de construção.

Concretamente para este trabalho é possível traçar alguns caminhos para o seu aprofundamento:

- Verificação da viabilidade do modelo adotado em outras habitações com diferentes características;
- Análise de sensibilidade que permita apurar a influência do aumento da pressão induzida pelo ensaio na resposta obtida pelo extrator situado na casa de banho;
- Estudo do comportamento da membrana antirretorno incluída nas grelhas de admissão quando submetidas a ensaios de pressurização.
- Caracterização em laboratório dos elementos ensaiados e posterior comparação com os resultados obtidos *in situ*;
- Comparação das fichas técnicas dos diferentes elementos fornecidas pelo fabricante com os resultados obtidos *in situ*.

BIBLIOGRAFIA

Amaral, M. (2012). *Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ASTM E1827:2007 - Standard Test Methods for Determining Airtightness of Buildings Using an Orifice Blower Door.

ASTM E779:2003 - Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. 2003.

Barles, P., Boulanger, X. (2000). *Airtightness and Underpressures Measurements in French Apartments*, in Proceedings: Innovations in Ventilation Technology. 21st Air Infiltration and Ventilation Centre Conference, September 26-29, Hague, Holland.

BlowerDoor - <http://www.blowerdoor.de/en/service/reports.html> - Março de 2014

Bracke, W., Laverge, J., Bossche, N., Janssens, A. (2013). *Durability and Measurement Uncertainty of Airtightness in Extremely Airtight Dwellings*. 34th AIVC Conference, 25- 26 September, p. 524 – 534, Athens, Greece.

Caffey. (1979). *Residential air infiltration*. ASHRAE Transactions 85, p. 919–926.

Caillou, A., Orshoven, D. (2010). *Report on the building airtightness measurement method in European countries*. Belgian Building Research Institute.

Caillou, S., Orshoven, D. (2009). *ISO 9972: Position paper for propositions of revision Brainstorming document*. Belgian Building Research Institute.

Carrié, F., Wouters, P. (2012). *Building airtightness: a critical review of testing, reporting and quality schemes in 10 countries*. Technical Note AIVC 67, Air Infiltration and Ventilation Center.

Chan, W., Carrié, F., Novák, J., Litvak, A., Richieri, F., Solcher, O., Pan, W., Emmerich, S. (2012). *Building air leakage databases in energy conservation policies: analysis of selected initiatives in 4 European countries and the USA*. Technical Note AIVC 66, Air Infiltration and Ventilation Center.

Colliver, D.G., Murphy, W.E., Sun, W. (1992). *Evaluation of the techniques for the measurement of air leakage of building components*. Final Report of ASHRAE Research Project RP-438, University of Kentucky, Lexington.

Concannon, P. (2002). *Residential Ventilation*. Technical Note AIVC 57, Air Infiltration and Ventilation Center. Brussels.

Delmotte, C., (2013). *Airtightness of Buildings, Calculation of Combined Standard Uncertainty*. 34th AIVC Conference, 25- 26 September, p. 535 – 534, Athens.

Diamond, R.C., Modera, M.P., Feustel, H.E. (1986). *Ventilation and occupant behavior in two apartment buildings*. 7th AIVC Conference (Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-21862), Stratford-upon-Avon.

DIN 4108-7:2011 - Thermal Insulation and Energy Economy In Buildings, Part 7: Air Tightness Of Buildings - Requirements, Recommendations And Examples For Planning And Performance.

Dubrul, C. (1988). *Inhabitants behavior with respect to ventilation*. Technical Note AIVC 23, Air Infiltration and Ventilation Centre.

EN 12207:1999 - Windows and doors, air permeability, classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN 13829:2001 - Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method.

Green Building Advisor - <http://www.greenbuildingadvisor.com/air-leaks-waste-energy-and-rot-houses> - Fevereiro de 2014.

Green Building Advisor - <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/musings/blower-door-basics> - Março de 2014.

Guyot, G., Jobert, R. (2013). *Detailed Analysis of Regulatory Compliance Controls of 1287 Dwellings Ventilation Systems*. 34th AIVC Conference, 25- 26 September, p. 306 – 316, Athens.

Harrje, D.T., Born, G.J. (1982). *Cataloguing air leakage components in houses*. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, D.C.

ISO 9972:2012 - Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method.

Jokisalo, Juha. (2008) - *On design principles and calculation methods related to energy performance of buildings in Finland*.

Juodis, E. (2000). *Energy Saving and Airtightness of Blocks of Flats in Lithuania*. In Indoor Built Environment. Vol. 9, p. 143-147.

Juricic, S., Hung, C., Boithias, F., (2013). *Impact on IAQ of Building Material Emitted Pollutants Through Building Leaks: State of the Art and Sample Testing Methodology*. 34th AIVC Conference, 25- 26 September p. 545 – 551, Athens, Greece.

Kalamees, T., Korpi, M., Eskola, L., Kurnitski, J., Vinha, J. (2008). *The distribution of the air leakage places and thermal bridges in finish detached houses and apartment buildings*.

Kalamees, T., Kurnitski, J., Korpi, M., Vinha, J. (2007). *The distribution of the air leakage places and thermal bridges of different types of detached houses and apartment buildings*. Proceedings of the 2nd European Blower Door Symposium, 16–17 March, Kassel, Germany.

Kronvall, J., Boman, A. (1993). *Ventilation Rates and Air Tightness Levels in the Swedish Housing Stock. Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration*. 14th Air Infiltration and Ventilation Centre Conference, September 21-23, Copenhagen. Denmark.

Levenson, K. (2013). *Building Efficiency and Blower Doors*.

Liddament, W., (1986). *Air Infiltration Calculation Techniques, An application guide*.

Lstiburek, J., Pressnail, K., Timusk, J., (2002). *Air pressure and building envelopes*. Journal of Building Physics 26, 53-91 (2002).

Machado, A. (2013). *Aplicação do Ensaio de Porta Ventiladora à Avaliação da Estanquidade ao Ar de Edifícios de Habitação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NP 1037-1:2002 - Ventilação e Evacuação dos Produtos de Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás, Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural.

ODPM (2006). The Building Regulations, Approved Document Part F: Ventilation. Office of the Deputy Prime Minister, London. 2006.

Olivier, D. (1999). *Air Leakage Standards*.

Orme M, Leksmono N. (2002). *Ventilation modelling data guide*. AIVC Guide, Annex 5, Brussels, Belgium.

Orme. M; Persily. A. *Ventilation and Infiltration*. ASHRAE Fundamentals Handbook (2001), p.1-28.

Patel, T., Mitsingas, C., Miller, J., Newell, T. (2011). *Comparison of blower door and tracer gas testing methods for determination of air infiltration rates through building envelopes at normal operating conditions*. 5th International Conference on Energy Sustainability ASME, 7-10 August, Washington.

Persily, A. (1999). Myths about Building Envelopes. In *ASHRAE Handbook*.

Persily, A., Linteris, G. (1983). A comparison of measured and predicted infiltration rates. In *ASHRAE Handbook*.

PINTO, A. (2007). Limites para a permeabilidade ao ar da envolvente de edifícios. Eficiência energética e qualidade do ar interior. In *Cadernos Edifícios - Ventilação e da qualidade do ar interior*, v. 6, p. 83-97, LNEC, Lisboa.

Pinto, M., Viegas, J., Freitas, V. (2011). *Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal*. Building and Environment, v. 46 n. 12 p. 2480-2489.

Retrotec - <http://www.retrotec.com/sites/default/files/manual-guides-specs/ManualResidential%20Pressure%20&%20Air%20Leakage%20Testing.pdf> – Março de 2014.

Retrotec – Operation Manual Software Fantestic EN13829 Europe –
<http://retrotec.com/sites/default/files/manual-guides-specs/ManualFanTestic%20%28EN13829%20Europe%29.pdf> – Março de 2014.

Shaw, C.Y., Magee, R.J., Rousseau, J. (1991). Overall and Component Airtightness Values of a Five-Story Apartment Building. In *ASHRAE Transactions*, v. 97, p. 347-353.

Sherman, M.H. (1998). *The Use of Blower-Door Data*. University of California, California.

Sherman, M.H., Dickerhoff, D. (1998). Air-Tightness of U.S. Dwellings. In *ASHRAE Transactions*, v. 104, p. 1359-1367.

Sherman, M.H., Chan, R. (2004). *Building Airtightness: Research and Practice*. Lawrence Berkeley National Laboratory report no. lbnl-53356.

Silberstein, A., Hens, H. (1996). *Effects of air and moisture flows on thermal performance of insulations in ventilated roofs and walls*. *Journal of Building Physics* 19, 367-385.

Silva, F. (2011). *Caracterização Experimental e Numérica da Permeabilidade ao Ar da Envolvente e do Sistema de Ventilação de um Edifício “Gaioleiro”*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

STEPHEN, K. (2000). *Airtightness in UK Dwellings*. BRE Information Paper IP 1/00. Building Research Establishment. Garston.

Walker, I.S., Wilson D.J., Sherman, M.H. (1997). *A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations*. *Energy and Buildings*, v. 27, n. 3.

Younes, C., Shdid, C., Bitsuamlak, G. (2011). *Air infiltration through building envelopes: A review*. *Journal of Building Physics*, 2012.

ANEXOS

ANEXOS	A.1
ANEXO 1 – EXEMPLO RELATÓRIO DE ENSAIO	A.3
CASO DE ESTUDO 2 - ENSAIO Nº 8P	A.3
CASO DE ESTUDO 2 - ENSAIO Nº 8D	A.7
ANEXO 2 – ESCALA BEAUFORT.....	A.11
ANEXO 3 – FICHAS DE APOIO	A.13
ANEXO 3.1. - FICHA TÉCNICA PARA AVALIAÇÃO RPH PELO MÉTODO A	A.13
ANEXO 3.2. - FICHA TÉCNICA PARA AVALIAÇÃO RPH PELO MÉTODO B	A.17

ANEXO 1 – EXEMPLO RELATÓRIO DE ENSAIO

CASO DE ESTUDO 2 - ENSAIO Nº 8P

Relatório de ensaio para avaliação das renovações horárias em condições normais de funcionamento. Ensaio realizado em pressurização.

Building Air Leakage Test Results

In Compliance with European Norm EN13829

Building Details

Building Address:	Elevation:	20 m
	Height above ground:	3 m
Customer Info:	Building Volume, V:	185 m³
	Total envelope area, A _{T BAT}	121 m²
	Floor Area, A _F	74 m²
Test technician:	Building exposure to wind:	Edifício parcialmente
Test company: Faculdade	protegido	
Engenharia Universidade do Porto	Accuracy of measurements:	10%

Testing Details

Fan Model: Retrotec 1000	Fan SN:	Gauge Model: DM-2	Gauge SN: 208948
---	---------	--------------------------	-------------------------

Pressurização set

Date: **2014-05-26** Time: **11:59** to **12:11**

Environmental Conditions:

Barometric Pressure: **101,3** KPa from **Temperatura / pressão standard**.

Wind speed: **1: Ar ligeiro**

Temperature: Initial: indoors **18 °C** outdoors **15 °C**.
Final: indoors **18 °C** outdoors **15 °C**.

Test Data:

10 bias pressures taken for **10** sec each.

5 induced pressures taken for **20** sec each.

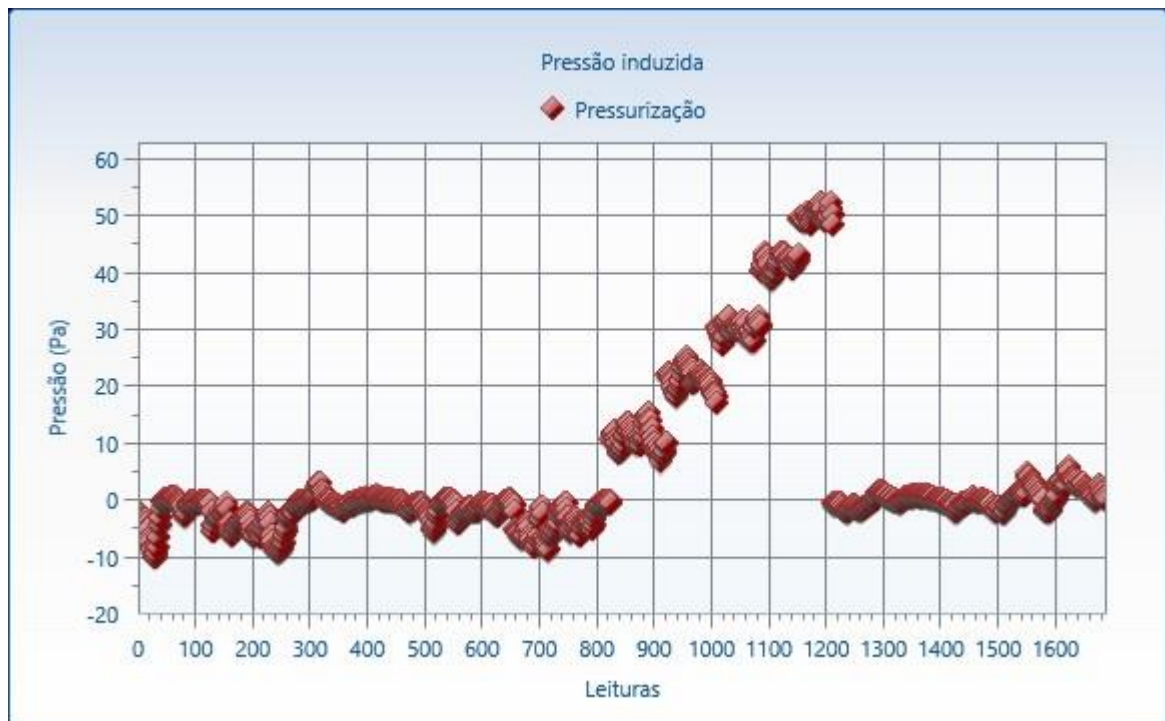
Bias, initial [Pa]	-2,73	-1,40	-4,89	-1,06	-0,28	-0,36	-1,69	-1,05	-5,20	-2,70		
Building Test Pressure [Pa]	10,2	20,6	29,4	40,9	49,4							
Bias, final [Pa]	-1,09	0,30	0,49	0,53	-0,61	-0,32	0,07	1,19	2,72	1,65		
Door Fan Pressure, [Pa]	72,2	119,5	181,2	241	282,1							
Range(s) Used	C4	C4	C4	C4	C4							
Total flow, V_r [m ³ /h]	580,4	735,9	915,7	1055,0	1139,6							
Corrected flow, V_{env} [m ³ /h]	580,9	736,6	916,5	1056	1141							
Error [%]	2,0%	-4,5%	1,5%	1,0%	0,2%							

Bias pressure Averages:

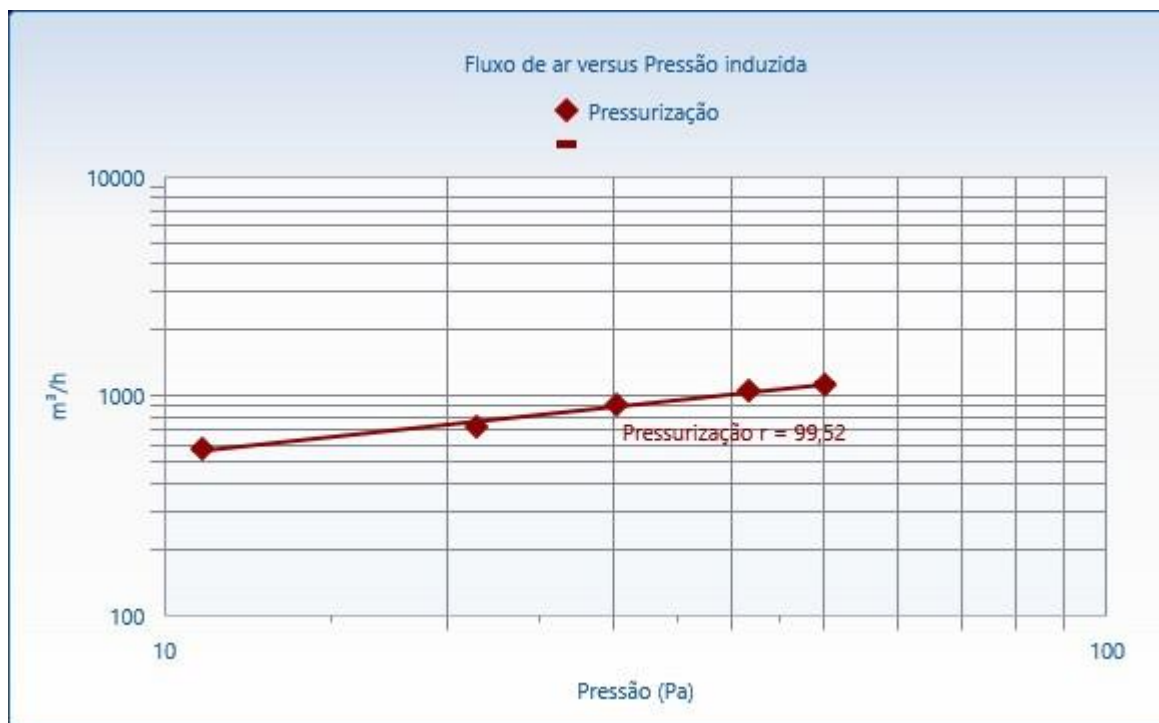
initial [Pa] ΔP_{01} -2,14, ΔP_{01-} -2,14, ΔP_{01+} 0,00

final [Pa] ΔP_{01} 0,49, ΔP_{01-} -0,68, ΔP_{01+} 0,99

Induced Pressure



Induced Pressure vs. Flow



Pressurização Test Results

	Results				Results	95% confidence		Uncertainty
Correlation, r [%]	99,52	95% confidence limits		Air flow at 50 Pa, V_{50} [m³/h]	1140	1070	1210	+/-6,7%
Intercept, C_{env} [m³/h.Pa ⁿ]	191,5	145,5	251,5	Air changes at 50 Pa, n_{50} [/h]	6,170	5,425	6,910	+/-12,0%
Intercept, C_L [m³/h.Pa ⁿ]	192,23	146,0	253,0	Permeability at 50 Pa, q_{50} [m³/h.m²]	9,431	8,298	10,564	+/-12,0%
Slope, n	0,4553	0,3735	0,5371	Specific Leakage at 50 Pa, w_{50} [m³/h.m²]	15,420	13,568	17,273	+/-12,0%

Dados de testes combinados

	Resultados	Intervalo de confiança de 95%		Incerteza
Air flow at 50 Pa, V_{50} [m ³ /h]	1140	1070	1210	+/-6,7%
Air changes at 50 Pa, n_{50} [1/h]	6,170	5,425	6,910	+/-12,0%
Permeability at 50 Pa, q_{50} [m ³ /h.m ²]	9,431	8,298	10,564	+/-12,0%
Specific leakage at 50 Pa, w_{50} [m ³ /h.m ²]	15,420	13,568	17,273	+/-12,0%

Test Notes: (adicionar notas aqui)

Calibration Certificate

Retrotec 1000						
Range	N	K	K1	K2	K3	K4
Open(22)	0,5214	519,618	-0,07	0,8	-0,115	1
A	0,503	264,996	-0,075	1	0	1
B	0,5	174,8824	0	0,3	0	1
C8	0,5	78,5	-0,02	0,5	0,016	1
C6	0,505	61,3	0,054	0,5	0,004	1
C4	0,5077	42	0,009	0,5	0,0009	1
C2	0,52	22	0,11	0,5	-0,001	1
C1	0,541	11,9239	0,13	0,4	-0,0014	1
L4	0,48	4,0995	0,003	1	0,0004	1
L2	0,502	2,0678	0	0,5	0,0001	1
L1	0,4925	1,1614	0,1	0,5	0,0001	1

Relatório de ensaio para avaliação das renovações horárias em condições normais de funcionamento.
Ensaio realizado em despressurização.

Building Air Leakage Test Results

In Compliance with European Norm EN13829

Building Details

Building Address:	Elevation:	20 m
	Height above ground:	3 m
Customer Info:	Building Volume, V:	185 m³
	Total envelope area, A _{T BAT}	121 m²
	Floor Area, A _F	74 m²
Test technician:	Building exposure to wind:	Edifício parcialmente
Test company: Faculdade	protegido	
Engenharia Universidade do Porto	Accuracy of measurements:	10%

Testing Details

Fan Model: Retrotec 1000	Fan SN:	Gauge Model: DM-2	Gauge SN: 208948
---	---------	--------------------------	-------------------------

Despressurização set

Date: **2014-05-26** Time: **12:15** to **12:27**

Environmental Conditions:

Barometric Pressure: **101,3** KPa from **Temperatura / pressão standard.**

Wind speed: **1: Ar ligeiro**

Temperature: Initial: indoors **18 °C** outdoors **15 °C**.
Final: indoors **18 °C** outdoors **15 °C**.

Test Data:

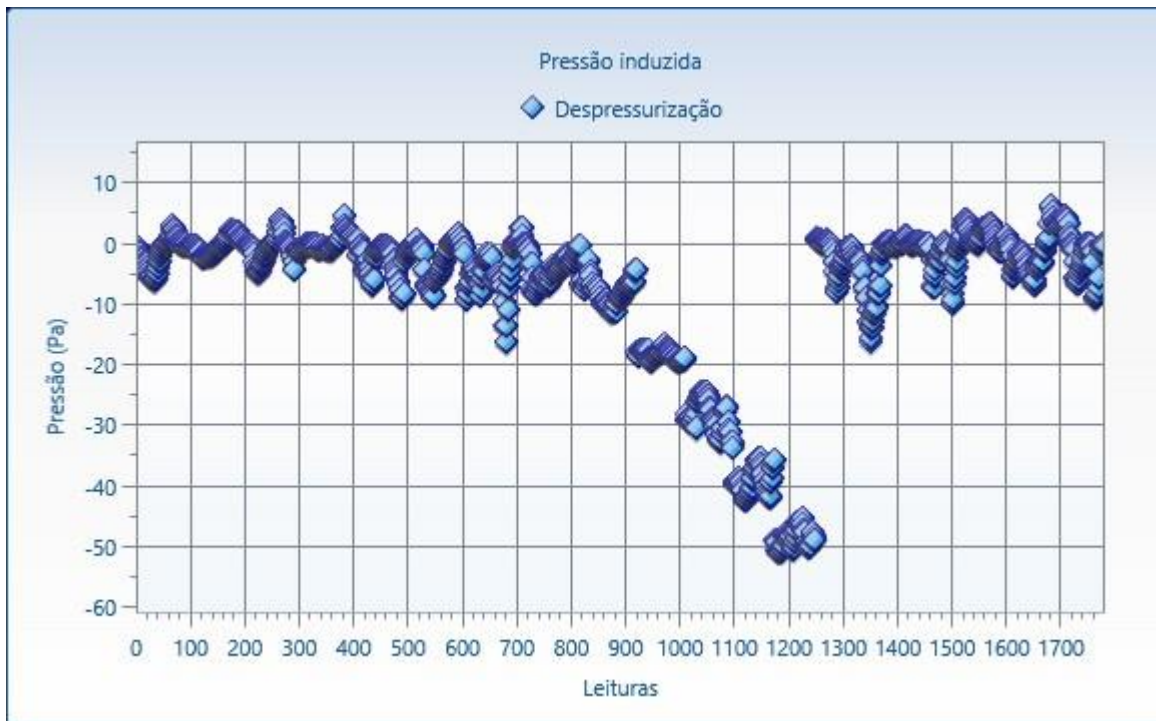
10 bias pressures taken for **10** sec each.

5 induced pressures taken for **20** sec each.

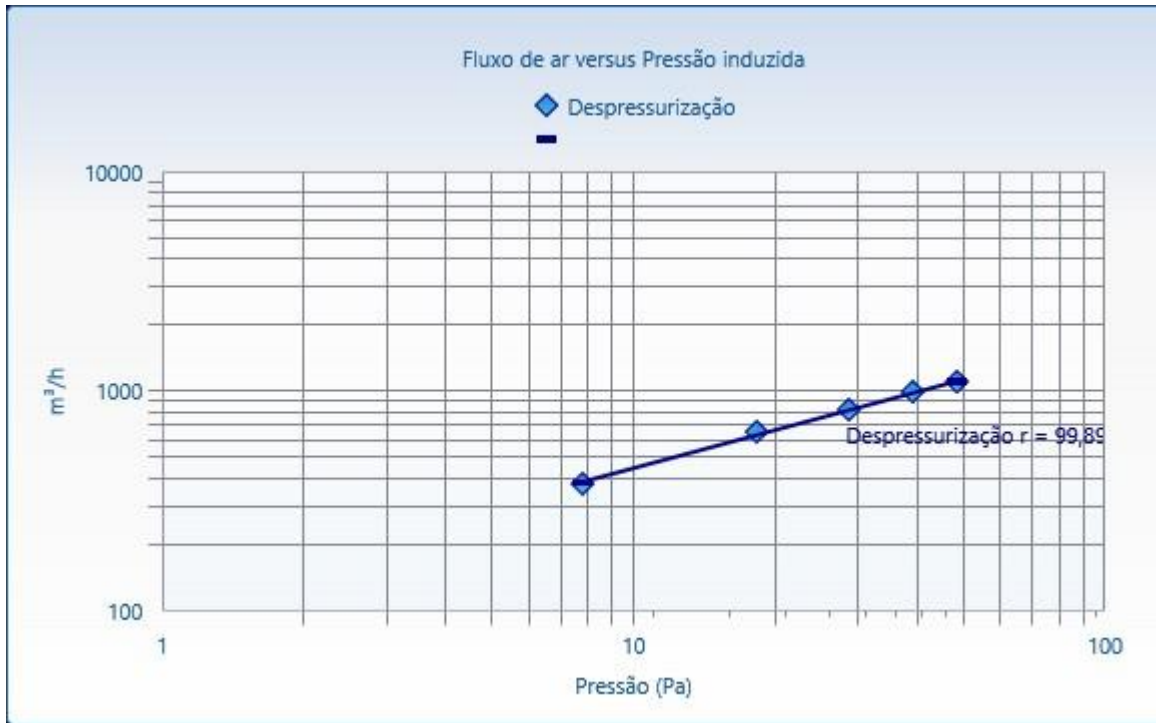
Bias, initial [Pa]	-1,71	-0,86	-0,43	0,05	0,32	-3,34	-3,14	-3,00	-4,15	-3,96		
Building Test Pressure [Pa]	-9,5	-19,9	-30,3	-40,8	-50,3							
Bias, final [Pa]	-1,60	-5,85	-0,92	-0,13	-2,90	1,94	-0,71	-3,38	2,75	-3,40		
Door Fan Pressure, [Pa]	27,7	80	124,8	178	221,4							
Range(s) Used	C4	C4	C4	C4	C4							
Total flow, V_r [m ³ /h]	384,3	660,5	828,5	993,2	1110,8							
Corrected flow, V_{env} [m ³ /h]	378,7	650,9	816,5	978,8	1095							
Error [%]	-1,7%	3,4%	-0,1%	0,0%	-1,4%							

Bias pressure Averages: initial [Pa] ΔP_{01} -2,02, ΔP_{01-} -2,57, ΔP_{01+} 0,18
final [Pa] ΔP_{01} -1,42, ΔP_{01-} -2,36, ΔP_{01+} 2,34

Induced Pressure



Induced Pressure vs. Flow



Despressurização Test Results

	Results				Results	95% confidence		Uncertainty
Correlation, r [%]	99,89	95% confidence limits		Air flow at 50 Pa, V_{50} [m^3/h]	1135	1080	1195	+/-5,0%
Intercept, C_{env} [$m^3/h.Pa^n$]	118,1	100,5	139,1	Air changes at 50 Pa, n_{50} [/h]	6,150	5,460	6,835	+/-11,2%
Intercept, C_L [$m^3/h.Pa^n$]	119,10	101,0	140,0	Permeability at 50 Pa, q_{50} [$m^3/h.m^2$]	9,401	8,351	10,451	+/-11,2%
Slope, n	0,5768	0,5264	0,6272	Specific Leakage at 50 Pa, w_{50} [$m^3/h.m^2$]	15,371	13,655	17,088	+/-11,2%

Dados de testes combinados

	Resultados	Intervalo de confiança de 95%		Incerteza
Air flow at 50 Pa, V_{50} [m ³ /h]	1135	1080	1195	+/-5,0%
Air changes at 50 Pa, n_{50} [/h]	6,150	5,460	6,835	+/-11,2%
Permeability at 50 Pa, q_{50} [m ³ /h.m ²]	9,401	8,351	10,451	+/-11,0%
Specific leakage at 50 Pa, w_{50} [m ³ /h.m ²]	15,371	13,655	17,088	+/-11,0%

Test Notes: (adicionar notas aqui)

Calibration Certificate

Retrotec 1000						
Range	N	K	K1	K2	K3	K4
Open(22)	0,5214	519,618	-0,07	0,8	-0,115	1
A	0,503	264,996	-0,075	1	0	1
B	0,5	174,8824	0	0,3	0	1
C8	0,5	78,5	-0,02	0,5	0,016	1
C6	0,505	61,3	0,054	0,5	0,004	1
C4	0,5077	42	0,009	0,5	0,0009	1
C2	0,52	22	0,11	0,5	-0,001	1
C1	0,541	11,9239	0,13	0,4	-0,0014	1
L4	0,48	4,0995	0,003	1	0,0004	1
L2	0,502	2,0678	0	0,5	0,0001	1
L1	0,4925	1,1614	0,1	0,5	0,0001	1

ANEXO 2 – ESCALA BEAUFORT

Escala de Beaufort, (Adaptado de ISO 9972:2012).

Escala Beaufort	Estado do Vento	Velocidade do vento [m/s]	Efeitos
0	Calmo Calm	Menor que 0.45	Folhas imóveis. O fumo sobe verticalmente
1	Aragens Light air	0.45 – 1.34	A direção do vento define-se pelo fumo mas não chega a desfraldar as bandeiras. Tremem as folhas das árvores
2	Fraco Light breeze	1.8 – 3.1	Sente-se o vento na cara. Movem-se as folhas das árvores. Geralmente, movem-se também as bandeiras.
3	Bonanzoso Gentle Breeze	3.6 – 5.4	As folhas das árvores agitam-se constantemente. Desfraldam-se as bandeiras.
4	Moderado Moderate Breeze	5.8 – 8	Levanta-se poeira e pequenos papéis. Movem-se os ramos pequenos das árvores.
5	Fresco Fresh Breeze	8.5 – 10.7	Movem-se as árvores pequenas. Formam-se pequenas vagas nos lagos.
6	Muito fresco Strong Breeze	11.2 – 13.9	Movem-se os ramos grandes das árvores. Sibilam os fios do telégrafo. Dificuldade em conservar aberto os guarda-chuvas.
7	Forte Moderate gale	14.3 – 17	As árvores sacodem-se. Dificuldade em andar contra o vento.
8	Muito forte Fresh Gale	17.4 – 20.6	Partem-se os pequenos ramos das árvores. Geralmente não se pode andar contra o vento.

ANEXO 3 – FICHAS DE APOIO

ANEXO 3.1. - FICHA TÉCNICA PARA AVALIAÇÃO RPH PELO MÉTODO A

FICHA TÉCNICA - ENSAIO PRESSURIZAÇÃO

AVALIAÇÃO RPH - CONDIÇÕES DE SERVIÇO

Data: ____ / ____ / ____ Hora: ____ : ____ Técnico: _____

INFORMAÇÃO DO EDIFÍCIO

Localização:	Notas adicionais:
Morada:	
Tipologia:	
Estado de conservação:	
Tipo de AVAC:	

<input type="checkbox"/>	Pressurização
<input type="checkbox"/>	Despressurização

DADOS:

Nível de Precisão	<input type="text"/>	[%]	Volume, V	<input type="text"/>	[m ³]
Elevação	<input type="text"/>	[m]	Área Envolvente Exterior, A _{env}	<input type="text"/>	[m ²]
*Altura Edifício	<input type="text"/>	[m]	Área Útil, A _F	<input type="text"/>	[m ²]
Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]
Inicial	<input type="text"/>	[m/s]			
Temperatura Inicial	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior	
Humidade Relativa	<input type="text"/>	[%] Interior	<input type="text"/>	[%] Exterior	
Altura Edifício × Δt:	<input type="text"/>	< 500 m.°C			

RESULTADOS:

Pressão Diferencial Inicial [Pa]												
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tempo por Diferencial de Pressão: _____ s

 ΔP_{01} : _____ ΔP_{01-} : _____ ΔP_{01+} : _____

Pressão Edifício [Pa]												
Pressão Porta Ventiladora [Pa]												

Tempo por Leitura de Pressão: _____ s

Pressão Diferencial Final [Pa]												
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 ΔP_{02} : _____ ΔP_{02-} : _____ ΔP_{02+} : _____

Velocidade do Vento
Final

	[Beaufort]
	[m/s]

Direção do Vento

	[°]
--	------

Temperatura Final

	[°C] Interior		[°C] Exterior
--	---------------	--	---------------

Fluxo Total [m³/h]												
Fluxo Corrigido [m³/h]												
Incerteza [%]												

Caudal de ar infiltrado pela envolvente

V_{50}

	[m³/h]
	Incerteza

Renovações por Hora

R_{ph50}

	[h⁻¹]
	Incerteza

Razão entre caudal escoado e área da envolvente

q_{50}

	[m³/h.m²]
	Incerteza

Razão entre caudal de ar escoado e área útil

w_{50}

	[m³/h.m²]
	Incerteza

Coefficiente de Escoamento de Ar

C_{env}

	[m³/h.Paⁿ]
--	------------

Coefficiente de Infiltração de Ar

C_L

	[m³/h.Paⁿ]
--	------------

Expoente de Escoamento

n

	[-]
--	-----

Correlação

r

	[%]
--	-----

ANEXO 3.2. - FICHA TÉCNICA PARA AVALIAÇÃO RPH PELO MÉTODO B

FICHA TÉCNICA - ENSAIO PRESSURIZAÇÃO

AVALIAÇÃO RPH – ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Data: ____/____/____

Hora: ____:____

Técnico: _____

☐

Pressurização

☐

Despressurização

DADOS:

Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]
Inicial	<input type="text"/>	[m/s]			
Temperatura Inicial	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior	
Humidade Relativa	<input type="text"/>	[%] Interior	<input type="text"/>	[%] Exterior	

Elemento Construtivo

Selado

Não
Selado

Dimensões

RESULTADOS:

V₅₀

[m³/h]

Rph₅₀

[h⁻¹]

q₅₀

[m³/h.m²]

w₅₀

[m³/h.m²]

C

[m³/h.Paⁿ]

n

[-]

r

[%]

Velocidade do Vento	<input type="text"/>	[Beaufort]	Direção do Vento	<input type="text"/>	[°]
Final	<input type="text"/>	[m/s]			
Temperatura Final	<input type="text"/>	[°C] Interior	<input type="text"/>	[°C] Exterior	

OBSERVAÇÕES: